

博士論文

中高齡者における全身持久性体力に及ぼす
動脈系コンプライアンスの影響

平成 15 年度

筑波大学大学院 体育科学研究科

大槻 毅

表のタイトル一覧

図のタイトル一覧

本研究で使用する略語と記号

第1章 序論

1.1. 本研究の背景

1.2. 本研究の目的

第2章 文献研究

2.1. 動脈系コンプライアンスに関する研究

2.1.1. 動脈系コンプライアンスの評価法

2.1.2. 動脈系コンプライアンスと循環動態との関連性

2.1.3. 動脈系コンプライアンスの加齢変化

2.1.4. 動脈系コンプライアンスに及ぼす持久性トレーニングの影響

2.2. 全身持久性体力に関する研究

2.2.1. 全身持久性体力の評価法

2.2.2. 全身持久性体力と循環動態との関連性

2.2.3. 全身持久性体力の加齢変化

2.2.4. 全身持久性体力に及ぼす持久性トレーニングの影響

2.3. 動脈系コンプライアンスと全身持久性体力との関連性

第3章 本研究の課題, 仮説, 方法, 限界

3.1. 本研究の課題

3.2. 本研究の仮説

3.3. 本研究で用いた方法

3.3.1. 被検者の募集方法

3.3.2. 動脈系コンプライアンスの評価法

3.3.3. 最大下運動時の循環動態の評価法

3.3.4. 最大下運動における全身持久性体力の評価法

3.4. 本研究の限界

3.4.1. 被検者

3.4.2. 運動負荷試験

3.4.3. 持久性トレーニング

第4章 動脈系コンプライアンスの算出に用いる動脈血圧波形の簡便な記録方法

4.1. 安静時における検討

4.1.1. 緒言

4.1.2. 方法

4.1.2.a. 被検者

4.1.2.b. 測定項目および測定方法

4.1.2.c. 解析方法

4.1.2.d. 統計処理

4.1.3. 結果

4.1.4. 考察

4.1.5. 要約

4.1.6. 結論

4.2. 運動時における検討

4.2.1. 緒言

4.2.2. 方法

- 4.2.2.a. 被検者
- 4.2.2.b. 測定項目および測定方法
- 4.2.2.c. 解析方法
- 4.2.2.d. 統計処理
- 4.2.3. 結果
- 4.2.4. 考察
- 4.2.5. 要約
- 4.2.6. 結論
- 第5章 動脈系コンプライアンスと最大下運動時の循環動態との関連性
 - 5.1. 動脈エラストランスおよび心拍出量の動態に関する検討
 - 5.1.1. 緒言
 - 5.1.2. 方法
 - 5.1.2.a. 被検者
 - 5.1.2.b. 測定項目および測定方法
 - 5.1.2.c. 解析方法
 - 5.1.2.d. 統計処理
 - 5.1.3. 結果
 - 5.1.4. 考察
 - 5.1.5. 要約
 - 5.1.6. 結論
 - 5.2. 心筋酸素摂取量に関する検討
 - 5.2.1. 緒言
 - 5.2.2. 方法
 - 5.2.2.a. 被検者
 - 5.2.2.b. 測定項目および測定方法
 - 5.2.2.c. 解析方法
 - 5.2.2.d. 統計処理
 - 5.2.3. 結果
 - 5.2.4. 考察
 - 5.2.5. 要約
 - 5.2.6. 結論
- 第6章 動脈系コンプライアンスと最大下運動における全身持久性体力との関連性
 - 6.1. 緒言
 - 6.2. 方法
 - 6.2.1. 被検者
 - 6.2.2. 測定項目および測定方法
 - 6.2.3. 解析方法
 - 6.2.4. 統計処理
 - 6.3. 結果
 - 6.4. 考察
 - 6.5. 要約
 - 6.6. 結論
- 第7章 動脈系コンプライアンスおよび最大下運動における全身持久性体力に及ぼす中等度の持久性トレーニングの影響
 - 7.1. 緒言
 - 7.2. 方法

- 7.2.1. 被検者
- 7.2.2. 測定項目および測定方法
- 7.2.3. 解析方法
- 7.2.4. 持続性トレーニング方法
- 7.2.5. 統計処理
- 7.3. 結果
- 7.4. 考察
- 7.5. 要約
- 7.6. 結論
- 第8章 総合討論
 - 8.1. 本研究で得られた成果
 - 8.2. 本研究で得られた成果の応用
 - 8.3. 今後の研究課題
- 第9章 結論

- 謝辞
- 引用文献
- 付記

表のタイトル一覧

- 第4章 動脈系コンプライアンスの算出に用いる動脈血圧波形の簡便な記録方法
Table 4-1-1 Characteristics and hemodynamics of subjects.
Table 4-2-1 Characteristics and hemodynamics of the elderly subjects.
Table 4-2-2 Characteristics and hemodynamics of the young subjects.
- 第5章 動脈系コンプライアンスと最大下運動時の循環動態との関連性
Table 5-1-1 Characteristics and hemodynamics of subjects.
Table 5-2-1 Characteristics and hemodynamics at rest.
Table 5-2-2 Hemodynamics during exercise.
- 第6章 動脈系コンプライアンスと最大下運動における全身持久性体力との関連性
Table 6-1 Characteristics and hemodynamics of subjects.
- 第7章 動脈系コンプライアンスおよび最大下運動における全身持久性体力に及ぼす中等度の持久性トレーニングの影響
Table 7-1 Effects of exercise training.

図のタイトル一覧

- 第1章 序論
Fig. 1-1 Windkessel function of the aorta.
- 第3章 本研究の課題, 仮説, 方法, 限界
Fig. 3-1 Calculation method of SAC.
- 第4章 動脈系コンプライアンスの算出に用いる動脈血圧波形の簡便な記録方法
Fig. 4-1-1 Relationships between K_{VC} and K_{AT} at rest in the elderly subjects.
Fig. 4-1-2 Relationships between K_{VC} and K_{AT} at rest in the young subjects.
Fig. 4-2-1 Typical example of carotid arterial blood pressure waveform.
Fig. 4-2-2 Relationships between K_{VC} and K_{AT} during exercise in the elderly subjects.
Fig. 4-2-3 Relationships between K_{VC} and K_{AT} during exercise in the young subjects.
- 第5章 動脈系コンプライアンスと最大下運動時の循環動態との関連性
Fig. 5-1-1 Comparison of SAC between the elderly subjects and the young subjects.
Fig. 5-1-2 Comparison of $\Delta E_a/\Delta WR$ between the elderly subjects and the young subjects.
Fig. 5-1-3 Comparison of $\Delta CO/\Delta WR$ between the elderly subjects and the young subjects.
Fig. 5-1-4 Comparison of $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ between the elderly subjects and the young subjects.
Fig. 5-1-5 Relationships between SAC and $\Delta E_a/\Delta WR$.
Fig. 5-1-6 Relationships between SAC and $\Delta CO/\Delta WR$.
Fig. 5-1-7 Relationships between SAC and $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$.
Fig. 5-1-8 Relationships between $\Delta E_a/\Delta WR$ and $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$.
Fig. 5-1-9 Relationships between $\Delta CO/\Delta WR$ and $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$.
Fig. 5-2-1 Relationships between SAC and DP_{20} .
Fig. 5-2-2 Relationships between SAC and DP_{50} .
Fig. 5-2-3 Relationships between SAC and ΔDP_{50-20} .
- 第6章 動脈系コンプライアンスと最大下運動における全身持久性体力との関連性
Fig. 6-1 Comparison of SAC between the elderly subjects and the young subjects.
Fig. 6-2 Comparison of $\dot{V}O_{2VT}$ between the elderly subjects and the young subjects.
Fig. 6-3 Relationships between SAC and $\dot{V}O_{2VT}$.
Fig. 6-4 Relationships between $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ and $\dot{V}O_{2VT}$.
- 第7章 動脈系コンプライアンスおよび最大下運動における全身持久性体力に及ぼす中等度の持久性トレーニングの影響
Fig. 7-1 Effects of exercise training on SAC and $\dot{V}O_{2VT}$.

本研究で使用する略語と記号

Ad	:	Total Diastolic Area: 左室拡張期の血圧波形下面積
As	:	Total Systolic Area: 左室収縮期の血圧波形下面積
AT	:	Applanation Tonometry: アプラーネーショントノメトリー
ATP	:	Adenosine Triphosphate: アデノシン三リン酸
A-V O ₂ diff	:	Arteriovenous Oxygen Difference: 動静脈酸素較差
A-V O ₂ diff _{MAX}	:	Maximal Arteriovenous Oxygen Difference: 最大動静脈酸素較差
CO	:	Cardiac Output: 心拍出量
CO _{MAX}	:	Maximal Cardiac Output: 最大心拍出量
CO ₂	:	Carbon Dioxide: 二酸化炭素
DBP	:	Diastolic Blood Pressure: 拡張期血圧
DP	:	Double Product: 二重積
DP ₂₀	:	Double Product during Exercise at 20 watt: 20 ワットでの運動時の二重積
DP ₅₀	:	Double Product during Exercise at 50 watt: 50 ワットでの運動時の二重積
Ea	:	Arterial Elastance: 動脈エラストランス
FR	:	Subjects in whom Favorable Record of Carotid Arterial Blood Pressure Waveform was Obtained: 頸動脈血圧波形の安定した記録が得られた被検者
H ⁺	:	Hydrogen Ion: 水素イオン
HR	:	Heart Rate: 心拍数
HRR	:	Heart Rate Reserve: 予備心拍数
K _{AT}	:	動脈血圧波形の1心周期と左室拡張期の波形下面積比
K _{AT}	:	アプラーネーショントノメトリーにより記録された頸動脈血圧波形の1心周期と左室拡張期の波形下面積比
K _{VC}	:	ポリウムクランプ法により記録された指動脈血圧波形から変換された上腕動脈血圧波形の1心周期と左室拡張期の波形下面積比
La	:	Lactate: 乳酸
NO	:	Nitric Oxide: 一酸化窒素
P	:	Pressure: 動脈系の内圧
Pd	:	Blood Pressure at End Diastole: 左室拡張終期の血圧
PR	:	Subjects in whom Poor Record of Carotid Arterial Blood Pressure Waveform was Obtained: 頸動脈血圧波形の安定した記録が得られなかった被検者
Ps	:	Blood Pressure at End Systole: 左室収縮終期の血圧
SAC	:	Systemic Arterial Compliance: 動脈系コンプライアンス
SBP	:	Systolic Blood Pressure: 収縮期血圧
SV	:	Stroke Volume: 左室1回拍出量
SV _{MAX}	:	Maximal Stroke Volume: 最大左室1回拍出量
TCA	:	Tricarboxylic Acid: トリカルボン酸
V	:	Volume: 動脈系の容量
VC	:	Volume Clamp: ポリウムクランプ(法)
$\dot{V}CO_2$:	Carbon Dioxide Output: 二酸化炭素排泄量
$\dot{V}O_2$:	Oxygen Uptake: 酸素摂取量
$\dot{V}O_{2MAX}$:	Maximal Oxygen Uptake: 最大酸素摂取量
$\dot{V}O_{2VT}$:	Oxygen Uptake at Ventilatory Threshold: 換気性閾値における酸素摂取量
VT	:	Ventilatory Threshold: 換気性閾値

WR	:	Work Rate: 仕事率
$\Delta\text{CO}/\Delta\text{WR}$:	仕事率の増大に対する心拍出量の増加の比
ΔDP_{50-20}	:	20 ワットでの運動時から 50 ワットでの運動時にかけての二重積の変化量
$\Delta\text{Ea}/\Delta\text{WR}$:	仕事率の増大に対する動脈エラスタンスの増大の比
$\Delta\text{V}/\Delta\text{P}$:	動脈系の容量の変化量と内圧の変化量の比
$\Delta\text{V}/\Delta\text{P}/\text{V}$:	動脈系の容量の変化量と内圧の変化量の比を動脈系の容量で補正した値（動脈壁の伸展性）
$\dot{\text{V}}\text{O}_2/\Delta\text{WR}$:	仕事率の増大に対する酸素摂取量の増加の比
% HRR	:	予備心拍数に対する運動時に増加した心拍数の割合

第1章 序論

1.1. 本研究の背景

ヒトは酸素を摂取して、生命活動のエネルギー源であるアデノシン三リン酸 (ATP; Adenosine Triphosphate) を生成する。とくに、歩行、走行あるいは水泳などの全身持久性運動時の筋では安静時に比べて多くの ATP が必要であり、酸素需要は増加する。心・血管系は酸素運搬に関わる主要な器官であり、全身持久性運動時には、心拍数および左室 1 回拍出量の増加により心拍出量 (CO; Cardiac Output) が増加する。また、抵抗血管の収縮および拡張により、活動筋に優先的に血液が分配される。このような心・血管系の働きにより、ヒトは運動を継続することができる。体育科学の分野では、心血管系を主題にした研究が盛んに行われており、健康の維持・増進、生活の質、および持久性競技にとっての、循環機能の重要性が認知されていることが伺える。

大動脈およびそれに連なる比較的太い動脈 (中心動脈) は血液を運搬する導管としての役割を有するが、一方で、中心動脈は伸展性に富み、心拍動による血液の流入に応じて伸展することで、拍動流成分を緩衝して間欠的な血液の流れを平滑化する作用、および拍動にともなう左室後負荷を軽減する作用を果たす (Fig. 1-1)⁶⁾。すなわち、中心動脈の伸展性が高い場合には、左室収縮期に血液が駆出されても、動脈の伸展によって圧が吸収されるので、動脈血圧の上昇は比較的軽度にとどまる。また、左室拡張期には、伸展された動脈が壁の弾性により元の径に戻ろうとする際に、動脈内に一時的に留められた血液は、途切れることなく末梢方向へ送り出されるので、左室拡張期の血圧低下は緩徐であり、なおかつ脈圧 (収縮期血圧と拡張期血圧の差) も小さい。しかしながら、動脈伸展性が低い場合には、収縮期血圧は上昇し、また、拡張期血圧は下降するので、脈圧は大きくなる⁶⁾。

動脈系コンプライアンスは、動脈系の容量 (V; Volume) の変化量と内圧 (P; Pressure) の変化量の比 ($\Delta V / \Delta P$) で表され、動脈系の伸展性と容量に規定される⁴⁸⁾。動脈壁の伸展性はコンプライアンスを容量で基準化した量 ($\Delta V / \Delta P / V$) である。したがって、

伸展性が低いほど、また容量が少ないほど動脈系コンプライアンスは小さい⁶⁷⁾。動脈系コンプライアンスが小さいと、動脈系が持つ拍動流成分の緩衝能も小さいので、COが大きく増加する必要がある持久性運動では、運動能力に影響を及ぼす可能性が考えられる。すなわち、動脈系コンプライアンスが低下すると、血圧の上昇にともない左室後負荷が増大するので、運動時の心ポンプ機能は制限されて、全身持久性体力が低下するという可能性である。近年、動脈系コンプライアンスに対する関心が高まっており、動脈系コンプライアンスないし動脈伸展性と最大酸素摂取量との間に有意の正相関が認められること^{13,43,78,79,85)}、あるいは症候限界性漸増負荷運動の持続時間との間に有意の正相関が認められること¹⁴⁾などが報告されている。しかしながら、多くは幅広い年齢層を一括して対象にした報告^{79,85)}や比較的若い年齢層を対象にした報告^{13,43)}であり、中高齢者のみを対象にした報告^{14,78)}は少ない。また、これらの研究^{13,14,43,78,79,85)}では動脈系コンプライアンスないし動脈伸展性と全身持久性体力との単相関分析が行われているのみであり、運動時の循環動態と関連付けた検討は行われていない。動脈伸展性は加齢にともない低下すること^{2,3,36,39,78,85)}、および加齢にともなう全身持久性体力の低下には心ポンプ機能の低下が大きく貢献すること^{55,61)}を考慮すると、中高齢者において、とくに、運動時の循環動態と関連付けた検討を行なう余地が未だ多く残されていると言える。

世界でも有数の長寿国家である日本にとって、高齢者の自立や社会参画は重要な課題であり、平成 13 年 12 月に閣議決定された高齢社会対策大綱においても、「多様なライフスタイルを可能にする高齢期の自立支援」や「地域社会への参画促進」が取り組むべき課題として設定されている。高齢者の全身持久性体力を維持・増進させることは、これらの課題を達成するために有用であると考えられるので、全身持久性体力を規定する因子についての知見を集積し、得られた知見を活用して健康の維持・増進や生活習慣病の予防を目的とした運動の普及と実践に努めることは、体育科学分野における大きな課題である。

1.2. 本研究の目的

本研究の目的は、中高齢者において動脈系コンプライアンスが全身持久性体力に及ぼす影響を、運動時の循環動態と関連させながら、明らかにすることである。中高齢者の日常生活においては、最大運動能力よりも、日常生活での身体活動の大勢を占める最大下運動における全身持久性体力が生活機能として重要であると考えられる。したがって、本研究では、動脈系コンプライアンスと最大下運動における全身持久性体力との関連を研究課題とする。加えて、持久性トレーニングによる動脈系コンプライアンスの変化が、全身持久性体力に及ぼす影響を検討することも課題とする。

これまでに中心動脈の機能が体育科学の分野で注目されることは少なかったが、本研究によりこの機能が生体に及ぼす影響が明らかになれば、動脈系コンプライアンスへの関心は高まり、動脈系コンプライアンスの維持・増大を狙いとした運動トレーニングに関わる研究の発展が期待される。動脈系コンプライアンスを維持・増大させることは、65歳以上では傷病別一般診療医療費構成割合が全体の32.2%(平成13年度、厚生労働省大臣官房統計情報部)に上る循環器系疾患の発症率を低下させるために重要な課題である。

第2章 文献研究

2.1. 動脈系コンプライアンスに関する研究

2.1.1. 動脈系コンプライアンスの評価法

局所的な動脈のコンプライアンスを侵襲的に評価する方法として、開胸手術中に大動脈を露出した状態で、血管の容積変化と壁圧変化を直接測定して、両者の比を求める方法がある²³⁾。この方法は局所的な動脈のコンプライアンスを直接的に評価できるが、実用的ではない。これに代わる非侵襲的な方法として、磁気共鳴映像法⁵⁸⁾や超音波法^{40,79)}を用いて、局所的な動脈径の変化からコンプライアンスを評価する方法がある。しかしながら、これらの方法を運動時に用いることは容易でない。また、動脈のコンプライアンスは、上行大動脈で大動脈弓に比べて、大動脈弓で下行大動脈に比べて大きいこと⁵⁸⁾が示すように部位により異なるので、局所的な動脈のコンプライアンスが動脈系全体のコンプライアンスを反映するとは限らない。

より広範囲の動脈伸展性を評価する指標として、2ヶ所で同時記録された脈波の伝播時間と伝播距離から算出される脈波伝播速度がある^{30,31)}。この方法は導管中を伝わる脈波の速度が管壁の硬度（伸展性の逆数）に比例することを利用しており、動脈硬化を早期に捉えることができる^{31,71)}。しかしながら、運動時のように体動をとまなう際に、異なる2箇所の脈波を同時記録することは容易ではない。また、動脈系コンプライアンスは動脈系の伸展性に加えて容量の影響も受けるので、動脈系コンプライアンスと動脈伸展性は必ずしも一致するわけではない。

動脈系全体のコンプライアンスの指標として最も有用なのは、中心動脈の血圧波形および血流量から算出されるSAC (Systemic Arterial Compliance) であろう。SACの算出方法には、左室拡張期の血圧減衰速度を用いる減衰時間法と、1心周期と拡張期の血圧波形下面積比を用いる面積法がある。減衰時間法は拡張期血圧が指数関数的に減衰すると仮定してSACを算出するが、実際の血圧の減衰は、末梢からの反射波等の影響を受けるために、必ずしも指数関数的ではない⁴⁹⁾。一方、面積法は、反射波による波

形の歪みの影響を少なくするために、波形下面積比を用いてSACを算出する方法であり⁴⁹⁾、動脈系コンプライアンスと運動との関連性について検討した研究^{13,14,42-44)}に多く用いられている。なお、イヌの動脈をいくつかの部位で閉塞し、それぞれの条件下でのSACを比較した研究⁷⁵⁾では、SACの約60%は大動脈に、残りの40%は他の動脈に依存するとされている。中心動脈の波形を非侵襲的に記録することは困難であるが、アプラーショントノメトリー(AT; Applanation Tonometry)により、頸動脈に経皮的にセンサーを当てて記録された波形で代用することができる¹³⁾。この波形をSACの算出に用いることの妥当性は、Cameron & Dart¹³⁾により検証されている。その研究では、3名の被検者における合計74心拍分の波形が、ATにより頸動脈で、またカテーテルを用いた侵襲法により大動脈で記録され、両者を重ね合わせると収縮期において両者はほぼ一致しており、拡張期においても頸動脈圧の減衰速度がやや速いものの両者はよく類似した。各々から算出される拡張期の波形下面積を比較すると、両者間に高い相関関係が認められ、Bland & Altman¹⁰⁾による検定でもバイアスは認められなかったとされている。ただし、ATによる波形の記録では、被検者は仰臥位にならなければならないし、被検者の皮脂が厚い場合や血圧が低い場合、あるいは運動時のように体動をとまなう場合には、センサーを正確に頸動脈の上に置いて波形を記録することは容易でない。したがって、より容易に波形を記録する方法があれば、有用であろうと考えられる。

血圧波形をより容易に記録できる方法の1つに、Portapres (TNO-TPD Biomedical Instrumentation)を用いたボリュームクランプ(VC; Volume Clamp)法がある。VC法により記録されるのは末梢(指)動脈の波形であるが、伝達関数により記録された波形を上腕動脈の波形に変換することが可能であり、変換された波形は侵襲的に記録された波形によく一致する^{11,24,25)}。この方法により得られた上腕動脈の波形を、中心動脈の波形の代用として波形下面積比の算出に用いることで、より簡便に動脈系コンプライアンスを評価できる可能性がある。しかしながら、この波形から算出された波形下面

積比をSACの算出に用いることの妥当性は検証されていない。

2.1.2. 動脈系コンプライアンスと循環動態との関連性

動脈の血圧および血流は、心拍動による血液の流入に応じて拍動する。動脈はそれらに応じて伸展し、拍動流成分を緩衝して間欠的な血液の流れを平滑化する作用、および左室後負荷を軽減する作用を果たす⁶⁾。これらの作用はパイプオルガンや消防ポンプに準えてウインドケッセル作用と呼ばれている⁶⁰⁾。動脈系コンプライアンスが大きい場合にはこの作用が十分に発揮されるので、左室収縮期に血液が駆出されても、動脈血圧の上昇は軽度である。また、左室拡張期には、伸展された動脈が壁の弾性により元の径に戻ろうとし、一時的に留められた血液が途切れることなく末梢方向へ送り出されるので、拡張期の血圧低下は緩徐であり、なおかつ脈圧も小さい。しかしながら、動脈伸展性が低下して動脈系コンプライアンスが低下した場合には、収縮期血圧は上昇し、また、拡張期血圧は下降するので、脈圧は大きくなる⁶⁾。

動脈血圧は左室後負荷の重要な規定因子である。左室後負荷は前負荷および心筋の収縮力と共に心ポンプ機能に影響を及ぼす⁸⁶⁾。すなわち、左室後負荷が増大すると心拍出量(CO; Cardiac Output)は減少するので、動脈系コンプライアンスが低下するとCOは減少すると考えられる。この仮説は、摘出したネコの心臓を、前負荷および後負荷を自在に制御できる人工の循環システムに接続した研究により検証されている¹⁹⁾。生体を対象にした研究では、ブタの上行大動脈にチャンバーを接続して動脈系コンプライアンスの増大をシミュレートすると、COは維持されたまま心筋の仕事量が減少したことから、左室からの血液駆出効率が高まることが示唆された⁴⁷⁾。一方、冠動脈灌流の主体は左室拡張期なので、動脈系コンプライアンスの低下による拡張期血圧の下降は、冠動脈血流量に悪影響を及ぼすと考えられる。これまでの研究では、イヌの胸部大動脈にバンドを巻いて動脈系コンプライアンスの低下をシミュレートすると、冠動脈予備量が減少した⁶³⁾。ヒトを対象にした研究においても、高血圧者は正常血圧者に比較して、動脈系コンプライアンス、冠動脈血流量、および冠動脈血流予備量はい

ずれも低値を示した⁶²⁾。ただし、これらは安静時や手術時における検討であり、運動時のように血流量や動脈血圧が上昇する条件下での検討は行われていない。

左室後負荷を規定する血管因子としては、動脈系コンプライアンスの他に末梢血管抵抗がある。末梢の血管（細動脈）は豊富な交感神経支配を受け、血管壁を取り巻く平滑筋組織の収縮・弛緩により血流量および血管抵抗の調整を行う。一般的には、高い伸展性を持つ大動脈の影響が大きい動脈系コンプライアンスは、末梢血管抵抗に比べると左室後負荷に対する貢献度が小さいと考えられる。実際に、麻酔下のイヌにカテーテルを挿入し、大動脈の血圧および血流を記録して、動脈系コンプライアンスの左室後負荷に対する貢献度を検討した研究⁶⁴⁾では、動脈系コンプライアンスの動脈インピーダンスに対する貢献度は約10%と低値であった。

2.1.3. 動脈系コンプライアンスの加齢変化

動脈系コンプライアンスは加齢とともに低下する^{56,58,79)}。この低下には、動脈伸展性の加齢による低下^{2,3,36,39,78,85)}が関与すると考えられる。動脈では血圧が高いほど一定の容量変化に対する血管内圧の上昇が大きいので、血圧が上昇すれば動脈伸展性は低下する⁶⁰⁾。しかしながら、正常血圧者においても、動脈伸展性は加齢とともに低下する⁸⁵⁾。また、血圧による補正を行った動脈伸展性も加齢とともに低下する^{36,39)}。動脈壁の弾性線維は動脈伸展性に影響を及ぼす主要な因子であり⁷⁾、その構成成分であるエラスチンの加齢とともに石灰化⁹⁵⁾や減少⁹⁴⁾が、動脈伸展性低下の原因であると考えられている。また、動脈伸展性はこのような器質的因子のみならず、動脈壁の機能的因子によっても規定される。機能的因子として最も影響が大きいのは、中膜平滑筋の緊張度である。近年、加齢により血管内皮細胞由来の血管拡張物質である一酸化窒素(NO; Nitric Oxide)の産生量が減少し^{50,84)}、その一方で血管収縮物質であるエンドセリンの産生量が増加することが報告されている⁵⁷⁾。これらの血管内皮細胞由来因子の産生能が加齢とともに変化することが、血管平滑筋の緊張度を増大させ、動脈伸展性を低下させる可能性が考えられる。加えて、高齢の高血圧患者では、カテコラミン受容体のうち、

平滑筋の緊張度を低下させる β 受容体の感受性は低下する一方で、緊張度を亢進させる α 受容体の感受性が亢進すること⁸⁾が、加齢による動脈伸展性の低下に影響する可能性も考えられる。

動脈系コンプライアンスの動脈インピーダンスに対する貢献度は約 10 % であったと報告されているように⁶⁴⁾、一般には、左室後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は低く、総末梢血管抵抗が左室後負荷の指標として用いられる。しかしながら、同研究⁶⁴⁾において環状鉤の装着により動脈硬化をシミュレートしたところ、その貢献度は約 20 % にまで増大した。加齢にともなって動脈伸展性は低下するので^{2,3,36,39,78,85)}、中高齢者では、左室後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は約 30 % にまで増大する¹⁵⁾。したがって、中高齢者や動脈硬化症の発症者においては、左室後負荷に及ぼす動脈系コンプライアンスの影響を無視できなくなると考えられる。運動時の循環動態に及ぼす動脈系コンプライアンスの影響を中高齢者において検討することは興味深い課題であると思われる。

2.1.4. 動脈系コンプライアンスに及ぼす持久性トレーニングの影響

横断的検討において、持久性競技者の動脈系コンプライアンスは、レクリエーションレベルの運動愛好家や運動習慣を持たない者に比較して有意の高値を示したと報告されている^{43,58,79)}。また、縦断的検討において、中高齢者では 5.3 日/週の持久性トレーニング (73 % 最高心拍数で 42 分/日) を 13.5 週間行うことで⁷⁹⁾、若齢成人では 3 日/週のトレーニング (75 % 最高仕事率で 30 分/日) を 4 週間行うことで¹³⁾、動脈系コンプライアンスは増大したことが報告されている。これらの報告は、いずれもトレーニングにより動脈系コンプライアンスが増大することを示唆する。動脈のコンプライアンスは動脈の伸展性と容量に規定されるが、弾性動脈では伸展性の寄与度が大きく⁶⁹⁾、また、動脈系コンプライアンスの約 60 % は弾性動脈である大動脈に依存するとされている⁷⁵⁾。したがって、トレーニングによる動脈系コンプライアンスの増大には、動脈伸展性の増大の寄与が大きいと考えられる。脈波伝播速度法を用いて動脈伸

展性に及ぼすトレーニングの影響を検討した報告では、持久性競技者の動脈伸展性は特別な運動習慣を持たない者に比べて高く⁸⁵⁾、また、30歳代³²⁾および40歳代⁶⁸⁾の男性に130分/日、6日/週の運動を、それぞれ10ヶ月間および4ヶ月間行わせると動脈伸展性は増大したとされている。これらの縦断的研究^{13,32,68,79)}で採用されたトレーニングは、いずれも比較的高強度(最高運動強度の約75%)あるいは高頻度(6日/週)であるが、強度および頻度が比較的低いトレーニングの影響や、日常の身体活動量の影響について検討した結果も報告されている。レクリエーションレベルの運動愛好家の動脈系コンプライアンスは運動習慣を持たない者に比べて、統計学的に有意ではないが10~17%高値であった⁷⁹⁾。また、1週間あたりの身体活動量が比較的小さい(平均で1,030 kcal)対象者において、身体活動量が多いほど動脈伸展性は高かった³⁹⁾。縦断的検討においては、動脈硬化危険因子の非保有者が、2日/週のトレーニング[抵抗性運動(15 RMで10~15回を1~2セット、7種目)と持久性運動(50%最大酸素摂取量で20~30分間)]を6ヶ月間行ったところ、動脈伸展性は有意に増大した³⁸⁾。これらの研究は、動脈系コンプライアンスを増大させるには、トレーニングの強度あるいは頻度を、必ずしも高く設定する必要はないことを示唆する。最後に、動脈伸展性に及ぼす運動の効果は、若齢期における運動習慣の有無にかかわらず、中齢期以降に開始した運動習慣でも得られること、およびその効果を維持するためには運動を継続することが重要であることも示唆されている³⁷⁾。

持久性トレーニングによる動脈系コンプライアンス増大の機序については、器質的および機能的因子の影響が検討されている。器質的因子については、ラットにおける16週間のトレーニングにより、大動脈伸展性の増大と同時に、動脈壁のエラスチン量の増加、およびカルシウム量の減少が認められている^{53,54)}。動脈伸展性に影響を及ぼす可能性のある機能的因子については、3ヶ月間のトレーニング(5日/週、30分/日、80%換気性閾値)により、血中エンドセリン濃度が低下したことが報告されている⁵²⁾。加えて、2ヶ月間のトレーニング(3~4日/週、60分/日、70%最大酸素摂取量)

により血中のエンドセリン濃度が低下したと同時に、NO濃度は増大したことも報告されている⁵¹⁾。

2.2. 全身持久性体力に関する研究

2.2.1. 全身持久性体力の評価法

全身持久性体力が高ければ、絶対的負荷強度が等しい運動でも、相対的負荷強度が低下するので、最大下運動を持続しやすい。したがって、全身持久性体力は体育科学における関心事の1つであり、これまでに数多くの研究が行われてきた。全身持久性運動に必要なエネルギーの生成は、主に酸素の介在下で行われるので、呼吸循環器系における酸素の取り込み・運搬・利用能に強く依存する。このために、現在、最も信頼性の高い全身持久性体力の指標として最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2MAX}$; Maximal Oxygen Uptake) や換気性閾値 (VT; Ventilatory Threshold) における酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2VT}$; Oxygen Uptake at Ventilatory Threshold) が用いられている⁸³⁾。ただし、両者の指標としての意味は完全に一致するわけではなく、持久性競技者を対象にした検討では、競技パフォーマンスに及ぼす影響は、 $\dot{V}O_{2VT}$ で $\dot{V}O_{2MAX}$ よりも大きいことが示唆されている^{81,82)}。VTは「有酸素性代謝によるエネルギー生成に無酸素性代謝によるエネルギー生成が加わる直前の運動強度」と定義される⁸⁸⁾ように、疲労が比較的軽度な状態で行える運動強度の最大値であり、持久性競技のパフォーマンスをよく反映するのであろう。また、強度がVTを超える運動では、心筋酸素摂取量の増加が顕著であること^{12,66,80)}や、交感神経系の亢進が認められること⁹³⁾も報告されており、VTは心血管系への負荷が比較的軽度な運動強度の最大値であるとも言える。したがって、VTが大きければ日常生活における身体活動を、疲労感が少なく、循環器疾患の危険性が低い状態で行えると考えられる。このことは、疲れやすく、循環器疾患の危険性が高い中高齢者にとって、とくに重要であり、全身持久性体力に関連した研究を、 $\dot{V}O_{2VT}$ を指標として行うことの意味は大である。

前述のVTの定義⁸⁸⁾は、細胞レベルの代謝と呼吸循環の密接な関係を前提とした以下

の概念に立脚している。有酸素性のエネルギー生成過程において、筋細胞でグルコース六リン酸から形成されたピルビン酸はアセチルコリンAを経てトリカルボン酸（TCA; Tricarboxylic Acid）サイクルに入り、効率よくアデノシン三リン酸（ATP; Adenosine Triphosphate）が生成される。しかしながら、TCA サイクルの代謝効率はそれに続く電子伝達系で必要とされる酸素濃度に規定される。そのために、酸素供給の不十分な状況下では、解糖系で産生されたピルビン酸はTCA サイクルに入れず、還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチドを酸化するための水素イオン（ H^+ ; Hydrogen Ion）の受容体となって乳酸（La; Lactate）を産生する。その H^+ は重炭酸イオンで緩衝され、その結果、二酸化炭素（ CO_2 ; Carbon Dioxide）が産生されて血中に出る。この CO_2 が呼吸中枢を刺激して換気を亢進させるために、漸増負荷運動時の呼気ガス動態に閾値が生じるというものである。この概念⁸⁸⁾に対しては、血中La濃度の上昇にはカテコラミンが関与すること⁷⁴⁾、換気の亢進は必ずしも血中 H^+ 濃度の上昇をともなわないこと²⁷⁾、血中La濃度および H^+ 濃度が高い条件で運動を行ってもVTは変化しないこと²⁰⁾などから、疑問が呈されていることも事実である。しかしながら、VTの概念は理解しやすく、決定法⁵⁾や生理学的意義の解釈も実践的であるので、VTは全身持久性体力の指標として研究や臨床で多く用いられている。

2.2.2. 全身持久性体力と循環動態との関連性

全身持久性運動に必要なエネルギーは主に酸化的過程により生成されるので、酸素摂取能力が全身持久性体力に及ぼす影響は大きい。酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$; Oxygen Uptake）はCOと動静脈酸素較差（A-V O_2 diff; Arteriovenous Oxygen Difference）の積なので、CO、すなわち心ポンプ機能と、A-V O_2 diff、すなわち筋での酸素の取り込み・利用能は全身持久性体力の重要な規定因子になる¹⁸⁾。先行研究においては、全身持久性体力が高い群の最大CO（ CO_{MAX} ; Maximal Cardiac Output）および最大A-V O_2 diff（A-V O_2 diff $_{MAX}$; Maximal Arteriovenous Oxygen Difference）は高値を示したことから、全身持久性体力における両者の重要性が指摘されている^{21,26,61)}。COは心拍数（HR; Heart Rate）と左室1

回拍出量 (SV; Stroke Volume) の積であるが、最大HRは年齢に依存するのに対して、SVは全身持久性体力が高い群で高値を示す^{26,61)}。したがって、心ポンプ機能の亢進により全身持久性体力を高めるには、SVの増加が重要であると考えられる。SVは左室の前負荷および後負荷と心筋の収縮能に依存する⁸⁶⁾。心筋は酸化能が高いので、心筋収縮のエネルギー生成には心筋酸素摂取量が重要である。したがって、運動時の一定強度の心筋酸素摂取量が増加すると心筋収縮の予備力は低下する可能性があり、また、心筋酸素摂取量の増加に見合うだけの酸素供給がなされないと、心ポンプ機能は低下する可能性が考えられる。一方、筋機能については、ミトコンドリアの酸化能と $\dot{V}O_{2MAX}$ および $\dot{V}O_{2VT}$ との間に有意の正相関が認められたこと⁹⁶⁾、持久性トレーニングにより筋線維組成が変化 (タイプ a線維が増加) したこと^{1,16)}、および毛細血管密度の増加と酸化系酵素活性の亢進が $\dot{V}O_{2MAX}$ の増加と同時に生じたこと¹⁶⁾などが報告されている。

2.2.3. 全身持久性体力の加齢変化

$\dot{V}O_{2MAX}$ や $\dot{V}O_{2VT}$ は加齢にともなって低下することが報告されている^{33,65)}。日本人を対象にした研究³³⁾によると、年齢が10歳増す毎に、 $\dot{V}O_{2MAX}$ は男性で $3.8 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、女性で $2.3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 減少し、 $\dot{V}O_{2VT}$ は男性で $2.2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、女性で $1.6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 減少する。この低下には、心ポンプ機能および筋機能の低下が関与すると考えられる⁶¹⁾。ただし、Ogawa et al.⁶¹⁾の報告では、若齢成人 (18~31歳) に比べて中高齢者 (51~72歳) の $\dot{V}O_{2MAX}$ は40%低く、 CO_{MAX} およびA-V $O_2\text{diff}_{MAX}$ はそれぞれ30%および10%低かった。また、安静時、最高仕事率の30%および60%の運動時において $\dot{V}O_2$ およびCOを測定して直線回帰式を算出したところ、中高齢者と若齢成人で回帰式の傾きはほぼ同等であったが、中高齢者では切片が低値であり、同一の $\dot{V}O_2$ におけるCOは少なかった⁵⁵⁾。これらの結果から、加齢にともなう全身持久性体力の低下には心ポンプ機能低下の関与の方がより大きい可能性が示唆される。

2.2.4. 全身持久性体力に及ぼす持久性トレーニングの影響

中高齢者においても若齢成人においても、全身持久性体力にトレーニングが認められることは多くの研究により示されている^{4,70,72,92}。ただし、これらの研究における全身持久性体力の改善の度合は、当然のことながら異なる。この差異を規定する因子としては、被検者の遺伝的特性やトレーニング開始前の体力水準等も考えられるが、最も影響が大きいのはトレーニングの強度および頻度であろう。持久性トレーニングの強度および頻度が $\dot{V}O_{2MAX}$ の改善に及ぼす影響を検討した研究⁷²)では、トレーニング効果が最も大きいのは両者がともに高い場合(80% $\dot{V}O_{2MAX}$, 3.3回/週)であり、逆に両者がともに低い場合(60% $\dot{V}O_{2MAX}$, 1.3回/週)には $\dot{V}O_{2MAX}$ の変化は認められなかった。ただし、強度が高いトレーニングは、継続性および安全性を考慮すると、中高齢者にとって必ずしも適切であるとは言えない。したがって、全身持久性体力を改善できる最低限のトレーニング強度を明らかにすることは重要な研究課題である。中高齢者(60~69歳)が40% 予備心拍数(HRR; Heart Rate Reserve)以下の強度(107 bpm)でのトレーニング(27分/日, 4.6日/週, 6ヶ月間)を行った研究⁷⁰)では、 $\dot{V}O_{2MAX}$ は10%増加したと報告されている。また、中高齢者(60歳以上)の38% HRR(112 bpm)でのトレーニング(25分/日, 3.1日/週, 9週間)においても、 $\dot{V}O_{2MAX}$ は16%増加したとされている⁴)。加えて、比較的低強度のトレーニング[抵抗性運動(15RMで10~15回を1~2セット, 7種目)と持久性運動(50% $\dot{V}O_{2MAX}$ で20~30分間)を2日/週]を6ヶ月間行ったところ、動脈硬化危険因子を有さない健常中高齢者において、大動脈脈波伝播速度の低下にともなって $\dot{V}O_{2MAX}$ は有意に増大したという報告³⁸)もある。これらの先行研究から、全身持久性体力の増大を狙いとしたトレーニングは、必ずしも高強度である必要はないと考えられる。

持久性トレーニングによる全身持久性体力の増大に関わる因子についての研究成果は、心ポンプ機能および筋機能の両者が全身持久性体力の増大に關与することを示唆している。例えば、トレーニングを行っている中高齢者は非活動的な中高齢者に比べ

て、 CO_{MAX} 、最大SV (SV_{MAX} ; Maximal Stroke Volume) およびA-V O_2diff_{MAX} は高値を示した^{21,26)}。最大下運動においても、SVおよびA-V O_2diff はいずれもトレーニング者で高値であった²⁶⁾。若齢成人においても、トレーニング者は運動習慣の非保有者に比べて、 CO_{MAX} 、 SV_{MAX} およびA-V O_2diff_{MAX} はいずれも高値であった⁶¹⁾。縦断的検討においては、最大下運動時(50ワットおよび60% $\dot{V}O_{2MAX}$)のSVおよびA-V O_2diff は、中高齢者および若齢成人における20週間のトレーニング(55~75% $\dot{V}O_{2MAX}$, 30~50分/日, 3日/週)により増大する傾向が認められている⁹²⁾。

2.3. 動脈系コンプライアンスと全身持久性体力との関連性

動脈系コンプライアンスと全身持久性体力との関連性については、いくつかの研究がある。幅広い年齢層の対象者(18~77歳)においては、動脈系コンプライアンスと $\dot{V}O_{2MAX}$ との間に、有意の正相関($n = 151$, $r = 0.44$)が認められている⁷⁹⁾。中高齢者においても、動脈系コンプライアンスと症候限界性漸増負荷運動の持続時間との間に、有意の正相関が認められた($n = 43$, $r = 0.34$)¹⁴⁾。比較的年齢層の低い中齢者(30~59歳)においては、高度な持久性トレーニング者($\dot{V}O_{2MAX}$ は $64.8 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)と運動習慣の非保有者(同 $40.0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)をひとまとめにした相関分析において、動脈系コンプライアンスと $\dot{V}O_{2MAX}$ との間に、有意の正相関($n = 50$, $r = 0.37$)が認められている⁴³⁾。若齢成人においては、高度のトレーニングにより動脈系コンプライアンスおよび $\dot{V}O_{2MAX}$ はそれぞれ有意に増大し、トレーニング前後の測定値をひとまとめにした相関分析において、両者間に有意の正相関($n = 47$, $r = 0.66$)が認められている¹³⁾。また、動脈伸展性の指標である脈波伝播速度(動脈伸展性が低いほど速い)を指標に用いた研究も行われている。Vaitkevicius et al.⁸⁵⁾は、幅広い年齢層の被検者(21~96歳, $n = 146$)において、大動脈脈波伝播速度と $\dot{V}O_{2MAX}$ との間に、有意の負の相関関係(男性; $r = -0.34$, 女性; $r = -0.49$)が認められたと報告している。Tanaka et al.⁷⁸⁾の研究では、中高齢者において、大動脈脈波伝播速度と $\dot{V}O_{2MAX}$ との間に有意の負の相関関係($n = 53$, $r = -0.66$)が認められた。これらの研究は、いずれも動脈系コンプライアンスと

全身持久性体力との間に有意の関連性が認められることを示唆するものである。ただし、中高齢者を対象にした報告¹⁴⁾では、著者自身が指摘しているように、漸増負荷運動の持続時間は筋力や体格の影響を受ける可能性があり、検討の余地が残されている。これらの報告はいずれも最大運動能力に焦点を当てており、 $\dot{V}O_{2VT}$ との関連性はこれまでに検討されていない。前述した柿山らの研究³⁸⁾では、軽度のトレーニング後に大動脈脈波伝播速度の有意な低下と $\dot{V}O_{2MAX}$ の有意な増大が認められたが、各々の変化量の間には有意の相関は認められなかった。

第3章 本研究の課題，仮説，方法，限界

3.1. 本研究の課題

文献研究により，本研究に関連した先行研究において，次の問題点があげられる．

- 1．ウインドケッセルモデルを用いた SAC (Systemic Arterial Compliance) の算出には，中心動脈血圧の波形下面積比が必要である．SAC を簡便に測定するために，ボリュームクランプ (VC; Volume Clamp) 法により指動脈で記録された波形を，伝達関数により上腕動脈の波形に変換して中心動脈血圧波形の代用に用いる方法が考えられるが，その妥当性は検証されていない．
- 2．動脈系コンプライアンスが循環動態を規定する因子であることは，いくつかの先行研究により示唆されているが，いずれの研究も手術時や安静時などの限られた条件下で行われている．運動時には，安静時に比べて心拍数 (HR; Heart Rate) ,心拍出量(CO; Cardiac Output) ,および収縮期血圧(SBP; Systolic Blood Pressure) は大きく変化する．そのような状況下において動脈系コンプライアンスが循環動態に及ぼす影響については，これまでに検討されていない．
- 3．動脈系コンプライアンスと全身持久性体力との関連性については，最大酸素摂取量や症候限界性運動の持続時間を指標に用いた研究成果がいくつか報告されている．しかしながら，中高齢者における検討は不十分である．また，日常生活における身体活動の多くは最大下努力で行われるので，最大下運動における全身持久性体力との関連性を検討することが，課題として残されている．
- 4．動脈系コンプライアンスが全身持久性体力に影響を及ぼすのであれば，持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスが増大すると，全身持久性体力も増大するはずである．これまでに行われた縦断的検討では，トレーニングにより動脈系コンプライアンスと全身持久性体力はそれぞれ増

大することが示されている。しかしながら、軽度ないし中等度のトレーニングの効果をみた研究は少なく、また、両者の増大の関連性は明らかにされていない。

以上の問題点を検討するために、本研究では以下の 4 つの研究課題を設定し、とくに中高齢者を対象にして、若齢成人とも比較しながら検討を行った。

1. 動脈系コンプライアンスの算出に用いる動脈血圧波形の簡便な記録方法

SAC の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を、VC 法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法の有用性と妥当性を検証する。

2. 動脈系コンプライアンスと最大下運動時の循環動態との関連性

動脈系コンプライアンスと、最大下運動時の左室後負荷、心筋酸素摂取量および心ポンプ機能との関連性を検討する。

3. 動脈系コンプライアンスと最大下運動における全身持久性体力との関連性

換気性閾値 (VT; Ventilatory Threshold) における酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2VT}$; Oxygen Uptake at Ventilatory Threshold) を最大下運動における全身持久性体力の指標として用い、動脈系コンプライアンスとの関連性を検討する。

4. 動脈系コンプライアンスおよび最大下運動における全身持久性体力に及ぼす中等度の持久性トレーニングの影響

トレーニング実験を行い、動脈系コンプライアンスと最大下運動における全身持久性体力に及ぼす中等度の持久性トレーニングの影響の関連性を検討する。

3.2. 本研究の仮説

本研究の目的を達成するために、以下の 4 つの仮説を設定した。

1. SAC の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を、VC 法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する

方法は有用であり，算出される値は妥当である．

- 2．動脈系コンプライアンスが低下するほど，最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大は大きくなり，心ポンプ機能の増大は小さくなる．また，動脈系コンプライアンスが低下するほど，最大下運動時の一定強度における心筋酸素摂取量は増加する．
- 3．動脈系コンプライアンスが低下するほど，最大下運動における全身持久性体力も低下する．
- 4．中等度の持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスが増大すると，最大下運動における全身持久性体力も増大する．

3.3. 本研究で用いた方法

3.3.1. 被検者の募集方法

被検者の特性が偏ることを避けるために，中高齢の被検者は広告により募集した．また，若齢成人の被検者は筆者が知人を通じて募集すると共に，広告によっても募集した．

3.3.2. 動脈系コンプライアンスの評価法

指動脈の血圧波形はVC法⁹⁰⁾を用いた記録装置（Portapres，TNO-TPD Biomedical Instrumentation）により連続記録され，100 Hzで数値化されて，コンピューターに取り込まれた．VC法は赤外線プレチスモグラフを内蔵した膨張性のカフを指に巻いて，サーボシステムによりカフの内圧を調節して容量を一定に保つことにより，容積の変動を血圧の変動に変換して記録する方法である⁹⁰⁾．記録された指動脈の波形は，付属の解析ソフトウェア（Beat Scope, TNO-TPD Biomedical Instrumentation）を用いて，上腕動脈の波形に変換された^{11,24,25,91)}．Beat Scopeでは伝達関数による歪みの修正と，中枢と末梢の間の血圧差の補正により波形の変換が行われる．変換された15秒間の連続波形および左室1回拍出量（SV; Stroke Volume）から，Liu et al.⁴⁹⁾の面積法（Fig. 3-1）によりSACを1心拍毎に算出し，平均値を求めた．面積法では，末梢からの反射波など

による波形の歪みが及ぼす影響を少なくするために、中心動脈の1心周期と左室拡張期の波形下面積比を用いてSACを算出する。変換された上腕動脈の波形下面積比をSACの算出に用いることの妥当性は、本研究の第4章で検討した。SVはVC法で記録された波形から、Beat Scopeを用いてモデルフロー法^{77,89)}により1心拍毎に算出された。モデルフロー法では血流量と血圧および動脈特性の関係をシミュレートすることで、血圧波形からSVが算出される。Beat Scopeでは、SVと同時に、上腕動脈のSBP、拡張期血圧(DBP; Diastolic Blood Pressure)およびHRも算出される。

3.3.3. 最大下運動時の循環動態の評価法

被検者は座位での15分以上の安静後に自転車エルゴメーター上に移り、呼気ガス測定用マスクおよびPortapresを装着し、さらに2分間の安静をとった後に、定常負荷のウォーミングアップ運動(20ワット、4分間)と症候限界性(年齢推定最高HR、下肢疲労、SBP > 250 mmHg)のランブ負荷運動(中高年齢者; 10 watt/min, 若年齢成人男性; 30 watt/min, 若年齢成人女性; 20 watt/min)を連続して行った。自転車エルゴメーター上における安静時および運動時の酸素摂取量($\dot{V}O_2$; Oxygen Uptake)と二酸化炭素排泄量($\dot{V}CO_2$; Carbon Dioxide Output)は、呼気ガス分析装置(AE 300S, ミナト医科学)を用いて1呼吸毎に測定された。また、Portapresで記録された指動脈の血圧波形はBeat Scopeにより上腕動脈の波形に変換され、SBP、DBPおよびHRとSVが1心拍毎に算出された(3.3.2. 参照)。

最大下運動時の心ポンプ機能の指標には、VTに至るまでの仕事率(WR; Work Rate)の増大に対する $\dot{V}O_2$ の増加の比($\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$)^{34,35)}、およびCO(SV × HR)の増加の比($\Delta CO/\Delta WR$)⁴⁶⁾を用いた。これらの指標は、測定された $\dot{V}O_2$ (CO)を15秒毎に平均し、先行研究^{34,35,46)}に従って、ランブ負荷運動開始1分後からVTに至る間におけるWRの増大に対する $\dot{V}O_2$ (CO)の増加の比として算出した。VTは $\dot{V}O_2$ と $\dot{V}CO_2$ を15秒毎に平均して、Beaver et al.⁵⁾のV-slope法に従い、 $\dot{V}O_2$ に対する $\dot{V}CO_2$ の急増点として決定した。両指標は最大下運動時の心ポンプ機能を反映すると考えられており、心不全

の進行にともなって低下する^{34,35)}。

最大下運動時の左室後負荷の指標として、 $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ および $\Delta CO/\Delta WR$ と同じ時点における、WRの増大に対する動脈エラスタンス (Ea; Arterial Elastance) の増大の比 ($\Delta Ea/\Delta WR$) を算出した。Eaは動脈系コンプライアンスと末梢血管抵抗を含めた全左室後負荷の指標であり、SBPとSVから次式^{15,41)}により算出した。

$$Ea = 0.9 \times SBP / SV$$

運動時の心筋酸素摂取量の指標として、二重積 (DP; Double Product)⁴⁵⁾を次式により算出した。

$$DP = SBP \times HR$$

DPは、最大下運動時の冠状動脈にカテーテルを挿入して測定した左室 100 gあたりの心筋酸素摂取量との間に、有意の高い正相関 ($r = 0.90$) が認められている⁴⁵⁾。DPの算出に用いたSBPおよびHRは、両者の同時記録装置 (DPBP system, 旭光物産) を用いて 20 秒毎に測定した。DPBP systemでは、SBPは上腕動脈におけるR波ゲーティング法により測定され、HRは心電図のR-R間隔から算出される。R波ゲーティング法では、動脈のコロトコフ音が心電図のR波を基準にしてマイクロフォンにより検出される。

3.3.4. 最大下運動における全身持久性体力の評価法

最大下運動における全身持久性体力の指標には $\dot{V}O_{2VT}$ を用いた。 $\dot{V}O_{2VT}$ は $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ 等の測定時において、VTが出現した時点の $\dot{V}O_2$ とした。

3.4. 本研究の限界

3.4.1. 被検者

被検者に明らかな疾患を有する者は含まれていない。また、被検者の多くは運動習慣を有さないか、レクリエーションレベルの運動愛好家であった。したがって、得られた知見が、寝たきり老人のような極端な低体力者や、競技者のような極端な高体力者にも当てはまるか否かは明らかでない。また、縦断的検討は、冠動脈危険因子を有さない中高齢者を対象に行った。したがって、縦断的検討で得られた知見が、疾患や

冠動脈危険因子の保有者にもそのまま当てはまるか否かも明らかでない。

本研究の被検者には，中高齢者では女性が多く，若齢成人では男性が多い．エストロゲンは一酸化窒素合成酵素の発現に関連すること²²⁾や，閉経後の女性においてホルモンの補充療法により動脈系コンプライアンスが増大すること⁵⁹⁾が報告されており，特に若齢成人では動脈系コンプライアンスに性差が認められる可能性がある．実際に，血管径で補正された動脈系コンプライアンスは，若齢成人では女性で，中高齢者では男性で大きかったという報告もある⁸⁷⁾．また， $\dot{V}O_{2VT}$ は，男性で女性に比べて高値を示す傾向にある³³⁾．したがって，被検者の性別に偏りがあることは本研究の限界であるといえる．

3.4.2. 運動負荷試験

本研究のランプ負荷運動におけるWRの増大速度は被検者により異なる（10～30 watt/min）．先行研究²⁹⁾ではWRの増大速度（15～30 watt/min）は $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ に有意の影響を及ぼさないと報告されているが，その後に発表された研究²⁸⁾では，増大速度（15～60 watt/min）が速いほど $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ は低値を示すと報告されている．後者の報告²⁸⁾でも，ランプ負荷運動の前半部分に限って言えば，15 watt/minと30 watt/minで $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ はほぼ同等であった．したがって，本研究においてWRの増大速度が $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ ， $\Delta CO/\Delta WR$ および $\Delta Ea/\Delta WR$ に影響を及ぼす可能性は低いにしても，この可能性を完全に否定することはできない．

3.4.3. 持久性トレーニング

縦断的検討における持久性トレーニングは自転車エルゴメーターを用いて行い，強度，時間，頻度はそれぞれ80% VT，30分/日，5日/週とした．トレーニングの効果は，これらの条件設定の影響を受けるので，本研究で得られた知見は，条件設定が異なる持久性トレーニングにおいても必ずしも適用されるとは限らない．

第4章 動脈系コンプライアンスの算出に用いる動脈血圧波形の簡便な記録方法

4.1. 安静時における検討

4.1.1. 緒言

SAC (Systemic Arterial Compliance) は動脈系の容量 (V; Volume) の変化量と内圧 (P; Pressure) の変化量の比 ($\Delta V / \Delta P$) で表される動脈系コンプライアンスの指標であり、ウインドケッセルモデルにより中心動脈の血圧波形下面積比を用いて算出することができる⁴⁹⁾。中心動脈、特に大動脈の波形を非侵襲的に記録することはできないが、アプラーショントノメトリー (AT; Applanation Tonometry) により頸動脈で非侵襲的に記録された波形をその代用に用いることができる¹³⁾。ATによる頸動脈の波形の記録は、被検者の動脈に経皮的にセンサーを当てて行なう。しかし、被検者は仰臥位にならなければならないし、被検者の皮脂が厚い場合や血圧が低い場合には、センサーを正確に頸動脈の上に置いて波形を記録することは容易でない。したがって、より簡便で容易に血圧波形を記録する方法があれば、有用であろうと考えられる。血圧波形を非侵襲的かつ容易に記録できる方法の一つに、Portapres (TNO-TPD Biomedical Instrumentation) を用いたボリュームクランプ (VC; Volume Clamp) 法⁹⁰⁾がある。この方法で記録されるのは末梢動脈 (指動脈) の波形であるが、付属する解析ソフト (Beat Scope; TNO-TPD Biomedical Instrumentation) を用いると、指動脈の波形を伝達関数により上腕動脈の波形に変換することができる。変換された上腕動脈の波形は実際の波形によく一致する^{11,24,25)}が、この波形の波形下面積比をSACの算出に用いることの妥当性は検証されていない。

本研究の目的は、SAC の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を、VC 法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法の妥当性を検討することである。本研究では、VC 法による指動脈の波形と AT による頸動脈の波形を同時に記録して、指動脈の波形を上腕動脈の波形に変換した後に、それぞれの波形下面積比を比較した。

4.1.2. 方法

4.1.2.a. 被検者

被検者は 47 名の中高齢者および 40 名の若齢成人である。Table 4-1-1 に被検者の身体特性および安静時の収縮期血圧 (SBP; Systolic Blood Pressure), 拡張期血圧 (DBP; Diastolic Blood Pressure) および心拍数 (HR; Heart Rate) を示す。全ての被検者に実験の目的と内容について説明し, 実験の参加に対する同意を得た。

4.1.2.b. 測定項目および測定方法

被検者は仰臥位にて 15 分以上の安静をとった後に, VC 法により指動脈の血圧波形を連続記録した (3.3.2. 参照)。同時に, AT による記録装置 (formPWV/ABI, 日本コーリン) を用いて, 頸動脈の波形を連続記録した。

4.1.2.c. 解析方法

血圧波形の解析には 15 秒間の連続記録を用いた。VC 法による指動脈の波形は第 3 章 (3.3.2.) で述べた方法によりコンピューターに取り込まれ, 上腕動脈の波形に変換された。AT による頸動脈の波形は, 1,200 Hz で数値化してコンピューターに取り込まれた (BTFC, 日本コーリン)。

面積法⁴⁹⁾による SAC の算出では, 中心動脈における 1 心周期と左室拡張期の血圧波形下面積比が必要である (3.3.2. 参照)。本章では, VC 法および AT により同時記録され, 数値化された波形を積分して, 1 心拍毎にそれぞれ波形下面積比 (K_{VC} および K_{AT}) を算出し, 15 秒間の平均値を求めた。

4.1.2.d. 統計処理

測定値は平均 \pm 標準偏差で示した。 K_{VC} と K_{AT} の相関と一致の程度は, ピアソンの単相関係数および Bland & Altman¹⁰⁾ の方法を用いて分析した。後者では, 両測定値の差の 95 % 信頼区間 { 差の平均値 \pm (1.96 \times 差の標準偏差) } とバイアスの 95 % 信頼区間 { 差の平均値 \pm (差の標準誤差 $\times t$); t は自由度 (標本数 - 1) の t 分布 } を算出した。統計学的有意水準は $p < 0.05$ とした。

4.1.3. 結果

中高齢者においては、 K_{VC} (1.64 ± 0.13) と K_{AT} (1.71 ± 0.13) との間に有意で高い正相関が認められ ($r = 0.73$, Fig. 4-1-1), しかも, 両者の差は -0.07 ± 0.09 (両者の差の 95%信頼区間: $-0.26 \sim 0.11$, バイアスの 95%信頼区間: $-0.10 \sim -0.04$) であり, 一致度も良好であった (Fig. 4-1-1). 若齢成人においては、 K_{VC} (1.62 ± 0.10) と K_{AT} (1.67 ± 0.12) との間に有意で高い正相関が認められ ($r = 0.76$, Fig. 4-1-2), しかも, 両者の差は -0.05 ± 0.08 (両者の差の 95%信頼区間: $-0.20 \sim 0.10$, バイアスの 95%信頼区間: $-0.07 \sim -0.02$) であり, 一致度も良好であった (Fig. 4-1-2).

4.1.4. 考察

Liu et al.⁴⁹⁾の面積法では,末梢からの反射波などによる血圧波形の歪みが及ぼす影響を少なくするために,中心動脈における1心周期と左室拡張期の波形下面積比がSACの算出に用いられる.本研究では,VC法により指動脈で非侵襲的に記録された波形を伝達関数により上腕動脈の波形に変換して^{11,24,25)},波形下面積比の算出に用いることの妥当性を検証した.比較に用いた波形は,VC法による波形の記録と同時に,ATにより頸動脈で記録された波形¹³⁾である.VC法により求めた K_{VC} とATにより求めた K_{AT} の間には高い相関関係が認められ,値の一致度も良好であった.したがって,SACの算出に必要な動脈血圧波形下面積比を,VC法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法の妥当性が示唆された.

VC法では,赤外線プレチスモグラフを内蔵した膨張性のカフを指に巻いて,サーボシステムによりカフの内圧を調節して容量を一定に保つことにより,容積の変動を血圧の変動に変換して記録する⁹⁰⁾.ただし,末梢動脈の血圧波形は,反射波などによる歪みのために,中心動脈の波形とは異なる¹¹⁾.したがって,中心動脈と末梢動脈では,波形下面積比が異なる可能性がある.しかし,PortapresとBeat scopeでは,指動脈の波形は,伝達関数による歪みの修正により上腕動脈の波形に変換され,変換された波形は上腕動脈において侵襲的に記録した波形とよく一致する^{11,24,25)}.しかしながら,血圧

の絶対値には収縮期で約 9 (14) mmHg, 拡張期で約 7 (12) mmHgの誤差が認められる^{11,25)}。これを誤差と血圧の関係式を用いて補正すると, 血圧の絶対値も上腕動脈において侵襲的に記録した値とよく一致する^{11,25)}。この方法を用いて日常生活における 24 時間の連続血圧測定を行った研究⁹¹⁾では, VC法と上腕動脈における侵襲法で得られた血圧の差は, それぞれ 1 (11) mmHgと-2 (7) mmHgであり, 両者はよく一致した。

Cameron & Dart¹³⁾は, SACの算出に頸動脈で非侵襲的に記録した血圧波形を用いる方法の妥当性を検証した。その研究では, 3名の被検者における合計 74心拍分の波形が, ATにより頸動脈で, またカテーテルを用いた侵襲法により大動脈で記録され, 両者を重ね合わせると左室収縮期において両者はほぼ一致しており, 拡張期においても頸動脈血圧の減衰速度がやや速いものの両者はよく類似した。各々から算出される拡張期の波形下面積を比較すると, 両者間に高い相関関係が認められ, Bland & Altman¹⁰⁾による検定でもバイアスは認められなかったとされている。本研究では, 47人の中高齢者および 40名の若齢成人において, 指動脈と頸動脈で波形が同時に記録され, 指動脈の波形は上腕動脈の波形に変換された。各々の波形下面積比の 15秒間の平均値を比較すると, 有意の高い相関関係が認められ, 一致度も良好であった。したがって, 面積法を用いる限り, 指動脈の波形から伝達関数で変換された上腕動脈の波形を用いる方法は, 頸動脈の波形を用いる方法と同等の妥当性を有することが示唆された。

Portapresを用いたVC法では, 同じ血圧波形の記録から, モデルフロー法による 1心拍毎の左室 1回拍出量 (SV; Stroke Volume) が面積比および血圧差と同時に算出できる⁸⁹⁾。一方のATによるSACの算出では, SVは超音波ドップラー法を用いて測定する必要がある^{13,14,42-44,87)}。しかも, ATによる波形の記録は仰臥位で行わなくてはならないが, VC法による血圧波形の記録は座位でも可能である。したがって, ATを用いた従来の方法と比較すると, 本研究で用いた方法は所要時間と労力および空間的制約が少ないという利点がある。この利点は特に多数の被検者を対象にする際に重要であり, 本法を広く適用することにより, 中高齢者における動脈系コンプライアンスと生活習慣病と

の関連，あるいは動脈系コンプライアンスと運動との関連等についての研究の発展が期待できる．

4.1.5. 要約

動脈系コンプライアンスの指標である SAC (Systemic Arterial Compliance) は，アプレーショントノメトリー (AT; Applanation Tonometry) により記録された頸動脈血圧波形の 1 心周期と左室拡張期の波形下面積比から算出できる．ただし，AT による波形の記録は必ずしも容易ではない．本研究の目的は，SAC の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を，ボリュームクランプ (VC; Volume Clamp) 法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法の妥当性を検討することである．

中高齢者 47 名および若齢成人 40 名において，VC 法および AT を用いて連続血圧波形を同時に記録した．指動脈の波形は，伝達関数により上腕動脈の波形に変換された．波形下面積比の，VC 法と AT による測定値の間には有意の高い正相関 (中高齢者 $r = 0.73$ ，若齢成人 $r = 0.76$) が認められ，一致度も良好であった．したがって，SAC の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を，VC 法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法の妥当性が示唆された．

4.1.6. 結論

安静時において，SAC の算出に必要な血圧波形下面積比を，ボリュームクランプ法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法は妥当である，という仮説が検証された．

4.2. 運動時における検討

4.2.1. 緒言

自転車ペダリング運動（65 % 最大酸素摂取量，30 分間）後に，動脈系コンプライアンスは急性に増大したこと⁴²⁾から，動脈系コンプライアンスは運動時に増大し，心拍出量の増加に貢献する可能性が考えられる．したがって，運動時の動脈系コンプライアンスを非侵襲的に評価することができれば，運動生理学の分野において重要な知見が得られるであろう．これまでに運動時の動脈系コンプライアンスを直接評価した報告はほとんどないが，その理由はおそらく測定の困難さによると考えられる．

第4章（4.1.）では，SACの算出に必要な動脈血圧波形下面積比をより簡便に算出するために，Portapresを用いたVC法⁹⁰⁾で安静時に記録した指動脈の波形を用いることの妥当性が検証された．Portapresは日常生活時の血圧を連続的に測定することを目的に開発された装置なので，運動時におけるSACの測定に応用できる可能性がある．本研究の目的は，軽度の運動時において，SACの算出に必要な動脈血圧波形下面積比を，VC法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法の有用性と妥当性を検討することである．本研究では，VC法による指動脈の波形とATによる頸動脈の波形を，軽度の運動時に同時記録して，指動脈の波形を上腕動脈の波形に変換した後に，それぞれの波形の記録の容易さと波形下面積比を比較した．

4.2.2. 方法

4.2.2.a. 被検者

被検者は22名の中高齢者（男性11名，女性11名）および22名の若齢成人（男性11名，女性11名）である．全ての被検者に実験の目的と内容について説明し，実験の参加に対する同意を得た．

4.2.2.b. 測定項目および測定方法

被検者は仰臥位にて15分以上の安静をとった後に，VC法により安定した指動脈の

血圧波形が得られることを付属するモニターで確認してから，血圧波形を連続記録した（3.3.2.参照）．また，頸動脈において安定した波形が得られることも，ATによる記録装置（formPWV/ABI，日本コーリン）のモニターで確認した．

次いで，仰臥位のまま自転車エルゴメーターに下肢を置き，軽運動（30 ワット，5 分間）を行った．運動時には，VC 法により指動脈の血圧波形を連続的に記録した．運動終了前に，AT により頸動脈の連続波形を記録した．

4.2.2.c. 解析方法

VC法による指動脈の血圧波形は，第3章（3.3.2.）で述べた方法によりコンピューターに取り込まれ，上腕動脈の波形に変換された．ATによる頸動脈の波形は，1,200 Hzで数値化してコンピューターに取り込まれた（BTFC，日本コーリン）．面積法⁴⁹⁾によるSACの算出（3.3.2.参照）では，1心周期と左室拡張期の波形下面積比が必要である．本章では，運動の終了直前の15秒間に，VC法およびATにより同時記録されて，数値化された血圧波形を積分して，1心拍毎にそれぞれ波形下面積比（ K_{VC} および K_{AT} ）を算出し，平均値を求めた．

安静時および運動時のSBP，DBP およびHR は，VC 法により記録された血圧波形から1心拍毎に算出されるので（3.3.3.参照），15秒間の平均値を求めた．運動強度を評価するため，年齢から予測される予備心拍数（HRR; Heart Rate Reserve）に対する運動時に増加したHRの割合（%HRR）を次式により算出した．

$$\% \text{HRR} = (\text{運動時の HR} - \text{安静時の HR}) \times 100 / \{ (220 - \text{年齢}) - \text{安静時の HR} \}$$

4.2.2.d. 統計処理

測定値は平均 ± 標準偏差で示した． K_{VC} と K_{AT} の相関と一致の程度は，ピアソンの単相関係数およびBland & Altman¹⁰⁾の方法を用いて分析した．後者では，両測定値の差の95%信頼区間{ 差の平均値 ± (1.96 × 差の標準偏差) }とバイアスの95% 信頼区間{ 差の平均値 ± (差の標準誤差 × t) : t は自由度 (標本数 - 1) の t 分布 } を算出した．安静時と運動時のSBP，DBPおよびHRの比較には，対応のある t 検定を用いた．

4.2.3. 結果

Fig. 4-2-1 の上の図は，AT により頸動脈で記録された，安定した連続血圧波形の典型例である．動脈血圧は，左室収縮期には急峻に上昇してピークに達した後に急峻に下降し，拡張期には緩やかに下降する．1 心周期の開始時と終了時の血圧はほぼ同等である．下の図は，AT により記録された不安定な波形の典型例である．1 心拍毎に波形が異なっており，また，1 心周期の開始時と終了時で血圧が異なる．収縮期と拡張期を分けるダイクロティックノッチの認識も困難である．拡張期において，連続的な血圧の下降が認められない例もある．典型的な波形（点線の円）も認められるが少数である．VC 法では全ての被検者で安定した連続波形が得られたが，AT で安定した波形が記録できたのは，中高齢者の 64 % (14 / 22, Table 4-2-1) および若齢成人の 86 % (19 / 22, Table 4-2-2) のみであった．このうち，男性では大多数（中高齢者 91 % : 10 / 11, 若齢成人 100 % : 11 / 11）で安定した記録が得られたが，女性で安定した記録が可能であった割合は低かった（中高齢者 36 % : 4 / 11, 若齢成人 73 % : 8 / 11）．記録された波形が不安定であると判定された被検者において，15 秒中に典型的な波形が得られたのは 0 ~ 5 心拍のみであった．被検者の身体特性，安静時および運動時の循環動態を，AT で安定した波形の記録が得られた被検者と，得られなかった被検者に分けて，Table 4-2-1（中高齢者）および Table 4-2-2（若齢成人）に示す．運動時には血圧と HR の増大は認められたが，% HRR が示すように，運動としては軽度であった．

K_{VC} と K_{AT} の比較は，AT により安定した波形が記録できた被検者で行った．中高齢者においては， K_{VC} (2.07 ± 0.21) と K_{AT} (2.00 ± 0.19) との間には，有意で高い正相関が認められ ($r = 0.89$, Fig. 4-2-2)，しかも，両者の差は 0.07 ± 0.10 （両者の差の 95% 信頼区間：-0.12 ~ 0.26，バイアスの 95% 信頼区間：0.01 ~ 0.13）であり，一致度も良好であった（Fig. 4-2-2）．若齢成人においては， K_{VC} (2.20 ± 0.20) と K_{AT} (2.18 ± 0.18) との間には，有意で高い正相関が認められ ($r = 0.83$, Fig. 4-2-3)，しかも，両者の差は 0.02 ± 0.11 （両者の差の 95% 信頼区間：-0.20 ~ 0.24，バイアスの 95% 信頼区間：-0.03

~0.08)であり,一致度も良好であった(Fig. 4-2-3).

4.2.4. 考察

運動時における連続血圧波形は,指動脈における VC 法では全ての被検者で安定した記録が可能であったが,頸動脈における AT で安定した記録が可能であったのは中高齢者の 64% および若齢成人の 86% のみであり,とくに女性では安定した記録が得られた例は少なかった(中高齢女性 36%, 若齢成人女性 73%). すなわち,運動時においても安定した波形の記録が得られるという点では,指動脈における VC 法は頸動脈における AT よりも優れていて,有用性が高いと考えられる. 一方, SAC の算出に必要な波形下面積比の VC 法による値と AT による値は高い相関関係にあり,両者の一致度も良好であった. したがって,軽度の運動時において, SAC の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を, VC 法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法の有用性と妥当性が示された.

AT を用いて頸動脈の血圧波形を連続的に記録する際には,センサーを経皮的に動脈の真上に置き続けることと,センサーへの適切な押圧を維持することが必要である. したがって,運動時のように体動をとまなう際に,安定した連続波形を記録することは必ずしも容易でない. 本研究における運動は,体動を抑制するために仰臥位で行い,また,運動時の% HRR が示すように強度を低く設定した. しかし,運動の開始前に AT による頸動脈の安定した波形が得られることは確認したが,運動時に連続して波形を記録することは容易ではなく,安定した記録の得られなかった例が多く認められた. その例は男性に比べて女性で多く,本研究の被検者には際立った肥満者はいなかったが,皮下脂肪が男性よりも厚い女性の血圧波形を,運動時に頸動脈で連続して記録することには困難がともなった. また,安定した記録が得られなかった割合は中高齢者で若齢成人に比べて多かった. 運動時の% HRR は中高齢者で若齢成人に比べて高く,女性で男性に比べて高かったことから,運動強度が高いほど, AT による波形の記録は困難になると考えられた. すなわち,運動時に頸動脈における AT を用いて SAC を評

価する場合には、被検者や実験条件の制約が多い。一方で、指動脈における VC 法では、本研究で行なった程度の軽運動であれば、運動時にも安定した連続波形が容易に得られるので、有用性が大きいと考えられる。

統計学的な有意差は認められなかったが、 K_{VC} と K_{AT} との相関係数は、運動時で安静時（4.1.参照）に比べて高値を示した。運動時における検討では、AT により安定した血圧波形の記録が得られなかった例があり、それらを除外して相関分析を行った。AT により安定した波形の記録が得られたか否かの判定は筆者自身が行ったが、除外された例で得られた波形は、いずれも典型的な波形とは顕著に異なっており、判定に迷うことはほとんどなかった。安静時における検討では、典型例と顕著に異なる波形は認められておらず、全被検者を対象に相関分析を行った。この違いが K_{VC} と K_{AT} との相関係数の違いに影響を及ぼしている可能性は否定できない。例えば、皮脂の肥厚等のためにセンサーを正確に頸動脈上に当てられなかった場合、運動時においては体動のために誤差が大きくなって不良な波形として認識されるが、安静時における誤差は比較的小さいために不良な記録として認識されなかったという可能性が考えられる。

本研究の限界は、運動時の評価を行なったといっても、運動強度は %HRR の 20 % 前後であり、より高強度の運動時における評価については残された課題であるということである。中等度あるいは高強度の運動時においても、SAC の算出に用いる血圧波形の記録法として妥当であるか否かについては、侵襲的に記録した大動脈内の波形と直接の比較をすることが必要であろう。

4.2.5. 要約

SAC (Systemic Arterial Compliance) は運動時の循環動態において重要な指標であり、中心動脈の血圧波形の波形下面積比を用いて算出される。本研究の目的は、軽度の運動時において、SAC の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を、ボリュームクランプ (VC; Volume Clamp) 法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕

動脈の波形を用いて算出する方法の有用性と妥当性を検討することである。

中高齢者 22 名および若齢成人 22 名において、VC 法による指動脈の血圧波形と、ア
プラネーショントノメトリー（AT; Applanation Tonometry）による頸動脈の波形を、軽
運動（30 ワット、5 分間）時に同時記録した。指動脈の波形は、伝達関数により上腕
動脈の波形に変換された。安定した波形が記録できた被検者の割合は、VC 法の 100 %
に対して、AT では中高齢者では 64 %のみ、若齢成人では 86 %のみであった。SAC の
算出に用いる 1 心周期と左室拡張期の波形下面積比を VC 法と AT で比べると、高い正
相関（中高齢者 $r = 0.89$ 、若齢成人 $r = 0.83$ ）と良好な一致度が認められた。以上の結
果から、軽度の運動時において、SAC の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を、VC
法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用
いて算出する方法の有用性と妥当性が示された。

4.2.6. 結論

軽度の運動時において、SAC の算出に必要な血圧波形下面積比を、ポリウムクラ
ンプ法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形
を用いて算出する方法は有用であり、算出される値は妥当である、という仮説が検証
された。

第5章 動脈系コンプライアンスと最大下運動時の循環動態との関連性

5.1. 動脈エラストランスおよび心拍出量の動態に関する検討

5.1.1. 緒言

一般には、左室後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は低いとされている⁶⁴⁾。しかしながら、前述の研究⁶⁴⁾において、環状鉤の装着により動脈硬化をシミュレートしたところ、動脈系コンプライアンスの貢献度は約10%から約20%にまで増大した。動脈伸展性は加齢とともに低下する^{2,3,36,39,78,85)}ので、中高齢者では動脈系コンプライアンスの左室後負荷に対する貢献度が大きくなると考えられる。実際に、安静時の中高齢者においては、動脈系コンプライアンスの左室後負荷に対する貢献度は約30%であったという報告¹⁵⁾もある。したがって、中高齢者では、動脈系コンプライアンスは運動時の左室後負荷にも有意の影響を及ぼす可能性がある。

心ポンプ機能は左室後負荷が大きいほど低い⁸⁶⁾ので、動脈系コンプライアンスが低下するほど心ポンプ機能も低下すると考えられる。実験動物を用いたモデルでは、左室の前負荷および後負荷を自在に制御できる人工の循環システムに摘出した心臓を接続して、動脈系コンプライアンスを低下（増大）させると血流量は減少（増加）することが示された¹⁹⁾。しかしながら、動脈系コンプライアンスが運動時の心ポンプ機能に及ぼす影響についての検討は、我々の知る範囲では行われていない。

本研究の目的は、動脈系コンプライアンスと最大下運動時の左室後負荷および心ポンプ機能との関連性を、中高齢者を対象に若齢成人と比較しながら検討することである。本研究では、1) 動脈系コンプライアンスが最大下運動時の左室後負荷および心ポンプ機能に有意の影響を及ぼす、すなわち、動脈系コンプライアンスが低下するほど、最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大は大きくなり、心ポンプ機能の増大は小さくなる、2) 動脈系コンプライアンスが低下していない若齢成人では、動脈系コンプライアンスが最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷および心ポンプ機能の増大に及ぼす影響は弱い、という仮説を設定した。

5.1.2. 方法

5.1.2.a. 被検者

被検者は 36 名の中高齢者 (59 ~ 77 歳) および 39 名の若齢成人 (18 ~ 33 歳) である (Table 5-1-1). 中高齢者では, 運動習慣を持たない被検者は 26 名, レクリエーションレベルの運動習慣を持つ被検者は 10 名, 若齢成人ではそれぞれ 5 名および 34 名であり, 高度なトレーニングを行っている被検者はいなかった. 実験の開始に先立って行った中高齢者の健康診断では, 明らかな疾患が認められた被検者はいなかったが, 17 名 (59 ~ 70 歳) は冠動脈危険因子の保有者であると診断された (高血圧, $n = 1$, 収縮期血圧 / 拡張期血圧 146/91 mmHg; 高脂血症, $n = 13$, 総コレステロール 220 ~ 249 $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$ もしくは中性脂肪 150 ~ 170 $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$; 高血糖, $n = 6$, 血糖 110 ~ 126 $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$). 被検者に喫煙習慣を持つ者と, 高血圧, 高脂血症および高血糖の服薬治療を受けている者は含まれていない. 被検者には, 実験の内容について十分な説明を行い, 実験参加への文書による同意を得た.

5.1.2.b. 測定項目および測定方法

運動負荷試験は第 3 章 (3.3.3.) のプロトコルを用いて行われ, その間に酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$; Oxygen Uptake) および二酸化炭素排泄量の測定 (3.3.3. 参照) と, 指動脈血圧波形の記録 (3.3.2. 参照) が行われた.

5.1.2.c. 解析方法

第 3 章 (3.3.2.) に述べた方法により, ウォーミングアップ運動終了直前 (ランブ負荷運動開始直前) の定常状態における 15 秒間の血圧波形から, SAC (Systemic Arterial Compliance) を算出した. また, 安静時および運動時の収縮期血圧 (SBP; Systolic Blood Pressure), 拡張期血圧 (DBP; Diastolic Blood Pressure), 心拍数 (HR; Heart Rate) および左室 1 回拍出量 (SV; Stroke Volume) は, 第 3 章 (3.3.3.) に述べた方法により指動脈血圧波形から算出された.

仕事率 (WR; Work Rate) の増大に対する動脈エラスタンス (E_a ; Arterial Elastance)

の増大の比 ($\Delta E_a/\Delta WR$), 心拍出量 (CO; Cardiac Output) の増加の比 ($\Delta CO/\Delta WR$), および $\dot{V}O_2$ の増加の比 ($\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$) を, 第 3 章 (3.3.2.) で述べた方法によりそれぞれ算出した。

SV は体格の影響を受けるので, SAC は体表面積で補正した¹⁵⁾。体表面積は Du Bois¹⁷⁾ の次式により算出した。

$$\text{体表面積} = \text{体重}^{0.425} \times \text{身長}^{0.725} \times 0.00718$$

5.1.2.d. 統計処理

中高齢者と若齢成人の比較には, 対応のない *t* 検定を用いた。各指標間の相関分析は, ピアソンの単相関係数を用いて行った。相関分析は, 全被検者で行うとともに, 中高齢者と若齢成人とに分けた分析も行った。測定値は平均 \pm 標準偏差で示し, 統計学的有意水準は $p < 0.05$ とした。

5.1.3. 結果

中高齢者では若齢成人に比べて, SAC (0.88 ± 0.26 vs 1.42 ± 0.26 ml \cdot mmHg $^{-1}\cdot$ m $^{-2}$, Fig. 5-1-1), $\Delta CO/\Delta WR$ (40.7 ± 13.3 vs 55.5 ± 16.9 ml \cdot min $^{-1}\cdot$ watt $^{-1}$, Fig. 5-1-3), および $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ (8.9 ± 1.0 vs 10.0 ± 0.8 ml \cdot min $^{-1}\cdot$ watt $^{-1}$, Fig. 5-1-4) はいずれも有意の低値を示した。 $\Delta E_a/\Delta WR$ は中高齢者で若齢成人に比べて有意の高値を示した { 1.02 ± 0.78 vs 0.09 ± 0.21 mmHg \cdot ml $^{-1}\cdot$ watt $^{-1}$ ($\times 10^{-3}$), Fig. 5-1-2 }。

全被検者および中高齢者においては, $\Delta E_a/\Delta WR$ は SAC との間に有意の相関関係が認められた (それぞれ $r = -0.61$ および $r = -0.36$, Fig. 5-1-5)。しかしながら, 若齢成人においては, $\Delta E_a/\Delta WR$ と SAC ($r = -0.15$, Fig. 5-1-5) との間に有意の相関関係は認められなかった。SAC と $\Delta CO/\Delta WR$ および $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ との間にも, 全被検者 (それぞれ $r = 0.49$, Fig. 5-1-6 および $r = 0.56$, Fig. 5-1-7) および中高齢者 (それぞれ $r = 0.36$, Fig. 5-1-6 および $r = 0.37$, Fig. 5-1-7) では有意の相関関係が認められたが, 若齢成人では有意の相関関係は認められなかった (それぞれ $r = 0.22$, Fig. 5-1-6 および $r = 0.25$, Fig. 5-1-7)。 $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ と $\Delta E_a/\Delta WR$ および $\Delta CO/\Delta WR$ との間にも, 全被検者 (それぞれ $r = -0.56$, Fig.

5-1-8 および $r = 0.45$, Fig. 5-1-9) および中高齢者 (それぞれ $r = -0.49$, Fig. 5-1-8 および $r = 0.46$, Fig. 5-1-9) では有意の相関関係が認められたが, 若齢成人では, 有意の相関関係は認められなかった (それぞれ $r = 0.11$, Fig. 5-1-8 および $r = 0.16$, Fig. 5-1-9).

5.1.4. 考察

左室の前負荷および後負荷を自在に制御できる人工の循環システムに摘出心を接続して, 動脈系コンプライアンスと心ポンプ機能との関連を検討した研究¹⁹⁾では, 動脈系コンプライアンスを低下 (増大) させると血流量は減少 (増加) した. しかしながら, 本研究の若齢成人における検討では, SACと $\Delta CO/\Delta WR$ および $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ との間に, 有意の関連性は認められなかった. 心ポンプ機能に影響を及ぼす因子には, 左室後負荷の他に前負荷と心筋の収縮力があり⁸⁶⁾, 左室後負荷を規定する因子としても, 動脈系コンプライアンスの他に末梢血管抵抗がある¹⁵⁾. 前述の研究¹⁹⁾では, 末梢血管抵抗, 前負荷 (左室への血液流入量) およびHRは制御されているのに対し, 本研究では, これらの因子の影響は補正されていない. したがって, 若齢者において, 動脈系コンプライアンスが運動強度の増大にともなう心ポンプ機能の増大に影響を及ぼす可能性は完全には否定できないにしても, その貢献度は小さく, 実際に測定されたSACと $\Delta CO/\Delta WR$ および $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ との間に有意の関連性は認められなかったと考えられる. 一方で, 中高齢者と若齢成人は同じ条件で実験を行なったにも関わらず, 全被検者および中高齢者においては, これらの指標間に有意の正相関が認められた. したがって, 若齢成人では動脈系コンプライアンスが最大下運動時の運動強度の増大にともなう心ポンプ機能の増大に及ぼす影響は弱い, 中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど, 心ポンプ機能の増大は小さくなることが示唆された.

動脈系コンプライアンスの動脈インピーダンスに対する貢献度は約 10 % であったと報告されているように⁶⁴⁾, 一般には, 左室後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は小さいと考えられている. しかしながら, 同研究⁶⁴⁾において環状鉤の装着により動脈硬化をシミュレートしたところ, その貢献度は約 20 % にまで増大した.

加齢にともなって動脈伸展性が低下するという報告^{2,3,36,39,78,85)}は数多くあり、本研究においても、中高齢者では若齢成人に比べてSACは有意に低値を示した。動脈系コンプライアンスが低下する中高齢者では、左室後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は、約30%と大きいことが報告されている¹⁵⁾。本研究において、全被検者および中高齢者ではSACと $\Delta E_a/\Delta WR$ との間に有意の負の相関関係が認められたが、若齢成人では有意の関連性は認められなかった。すなわち、若齢成人では動脈系コンプライアンスが最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大に及ぼす影響は弱いですが、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど、左室後負荷の増大は大きくなることが示唆された。したがって、動脈系コンプライアンスが左室後負荷の増大に及ぼす影響は中高齢者と若齢成人で異なるために、心ポンプ機能の増大に及ぼす影響も異なると考えられる。

全被検者および中高齢者では $\Delta E_a/\Delta WR$ と $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ との間に有意の相関関係が認められたが、若齢成人では有意の関連性は認められなかった。したがって、SACと $\Delta CO/\Delta WR$ および $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ との関連性が中高齢者と若齢成人で異なるのは、最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大に動脈系コンプライアンスが及ぼす影響が異なることに加えて、左室後負荷の増大が心ポンプ機能の増大に及ぼす影響も異なることが考えられる。本研究において、 $\Delta E_a/\Delta WR$ は中高齢者で若齢成人に比べて有意に高値を示した。心ポンプ機能に対する貢献度を、左室の前負荷および後負荷と心筋の収縮力で比較することは容易ではないが、中高齢者では最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大は大きく、心ポンプ機能の増大に対する貢献度も大きいですが、若齢成人では左室後負荷の増大は小さく、貢献度も小さい可能性が考えられる。

5.1.5. 要約

一般には、動脈系コンプライアンスが左室後負荷に及ぼす影響は小さいと考えられる。しかしながら、動脈系コンプライアンスは加齢とともに低下するので、中高齢者

では運動時の左室後負荷および心ポンプ機能に有意の影響を及ぼす可能性が考えられる。本研究の目的は、動脈系コンプライアンスと最大下運動時の左室後負荷および心ポンプ機能との関連性を、中高齢者を対象に若齢成人と比較しながら検討することである。

中高齢者 (n = 36) および若齢成人 (n = 39) を対象に自転車エルゴメーターを用いたランブ負荷運動試験を行い、SAC (Systemic Arterial Compliance) および運動開始時から換気性閾値に至る間の仕事率 (WR; Work Rate) の増大に対する動脈エラストランス (Ea; Arterial Elastance) の増大の比 ($\Delta Ea/\Delta WR$)、心拍出量 (CO; Cardiac Output) の増加の比 ($\Delta CO/\Delta WR$) および酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$; Oxygen Uptake) の増加の比 ($\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$) を測定した。中高齢者では若齢成人に比べて、SAC (0.88 ± 0.26 vs 1.42 ± 0.26 ml·mmHg⁻¹·m²)、 $\Delta CO/\Delta WR$ (40.7 ± 13.3 vs 55.5 ± 16.9 ml·min⁻¹·watt⁻¹) および $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ (8.9 ± 1.0 vs 10.0 ± 0.8 ml·min⁻¹·watt⁻¹) はいずれも有意の低値を示し、 $\Delta Ea/\Delta WR$ は有意の高値を示した { 1.02 ± 0.78 vs 0.09 ± 0.21 mmHg·ml⁻¹·watt⁻¹ ($\times 10^{-3}$) }。全被検者および中高齢者においては、SAC と $\Delta Ea/\Delta WR$ ($r = -0.61$ および $r = -0.36$)、 $\Delta CO/\Delta WR$ ($r = 0.49$ および $r = 0.36$) および $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$ ($r = 0.56$ および $r = 0.37$) との間に有意の相関関係が認められた。しかしながら、若齢成人においてはいずれも有意の相関関係は認められなかった ($\Delta Ea/\Delta WR$, $r = -0.15$; $\Delta CO/\Delta WR$, $r = 0.22$; $\Delta \dot{V}O_2/\Delta WR$, $r = 0.25$)。したがって、若齢成人では動脈系コンプライアンスが最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷および心ポンプ機能の増大に及ぼす影響は弱い、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど、左室後負荷の増大は大きくなり、心ポンプ機能の増大は小さくなることが示唆された。

5.1.6. 結論

動脈系コンプライアンスが低下するほど、最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大は大きくなり、心ポンプ機能の増大は小さくなる、という仮説が検証された。

5.2. 心筋酸素摂取量に関する検討

5.2.1. 緒言

動脈系コンプライアンスが低下すると、左室後負荷が増大して血液駆出における心筋のエネルギー需要量（心筋酸素摂取量）は増加すると考えられる。逆に動脈系コンプライアンスが増大すれば、左室後負荷は低下して心筋酸素摂取量は減少し、心筋のエネルギー効率は増大すると考えられる。ブタの上行大動脈にチャンバーを接続して動脈系コンプライアンスの増大をシミュレートした研究で、COは維持されたまま心筋の仕事量が低下したこと⁴⁷⁾は、この仮説を支持する。運動時にはCOの増加にともなって心筋酸素摂取量が増加するので、心筋酸素摂取量に見合うだけの酸素供給がなされなければ、心ポンプ機能の低下にともなって、全身持久性体力も低下する可能性もある。したがって、とくに運動時において、心筋酸素摂取量に関わる因子を検討することの意義は大きいと考えられる。中高齢者を対象にした先行研究¹⁴⁾では、動脈系コンプライアンスが低下するほど運動は早期に終了すること、安静時の心筋酸素摂取量は増加すること、安静時から最大運動時にかけての心筋酸素摂取量の増加は小さいことが報告されているが、動脈系コンプライアンスと最大運動時の心筋酸素摂取量との間に有意の関連性は認められなかった。しかしながら、最大運動強度自体が心ポンプ機能に影響されるはずなので、最大下運動における運動強度を統一した検討が課題として残されている。また、動脈系コンプライアンスの左室後負荷に対する貢献度は加齢とともに大きくなると考えられている¹⁵⁾が、動脈系コンプライアンスが運動時の心筋酸素摂取量に及ぼす影響を、中高齢者と若齢成人で比較した検討は行われていない。

本研究の目的は、動脈系コンプライアンスと最大下運動時の心筋酸素摂取量との関連性を検討することである。本研究では、1) 動脈系コンプライアンスは最大下運動時の心筋酸素摂取量に有意の影響を及ぼす、すなわち、動脈系コンプライアンスが低下するほど、最大下運動時の一定強度における心筋酸素摂取量は増加する、2) 動脈系コンプライアンスが低下していない若齢成人では、動脈系コンプライアンスが最大

下運動時の一定強度における心筋酸素摂取量に及ぼす影響は弱い，という仮説を設定した．本研究における心筋酸素摂取量の指標には SBP と HR の二重積 (DP; Double Product) を用いた．

5.2.2. 方法

5.2.2.a. 被検者

被検者は 100 名の中高齢者 (49~82 歳) および 36 名の若齢成人 (19~28 歳) である (Table 5-2-1)．中高齢者では 64 名，若齢成人では 18 名が運動習慣を持たない被検者であり，レクリエーションレベルの運動習慣を持つ被検者は中高齢者で 36 名，若齢成人で 18 名であった．高度なトレーニングを行っている被検者はいなかった．中高齢者では，実験の開始に先立って行なった健康診断に基づいて，被検者を冠動脈危険因子の非保有中高齢者 (n = 50; 年齢 51~79 歳; SBP/DBP 90~139/50~89 mmHg; 総コレステロール 129~219 mg·dl⁻¹; 中性脂肪 30~149 mg·dl⁻¹; 血糖 48~109 mg·dl⁻¹) および保有中高齢者 (n = 50; 年齢 49~82 歳; SBP/DBP 140~157/90~96 mmHg; 総コレステロール 220~249 mg·dl⁻¹; 中性脂肪 150~190 mg·dl⁻¹; 血糖 110~136 mg·dl⁻¹) に群分けした．明らかな疾患が認められた者と，高血圧，高脂血症および高血糖の服薬治療を受けている者は除外してあった．また，喫煙習慣を持つ被検者は含まれているが，実験当日には喫煙しないように指示した．被検者には，実験の内容について十分な説明を行い，実験参加への文書による同意を得た．

5.2.2.b. 測定項目および測定方法

運動負荷試験は第 3 章 (3.3.3.) のプロトコルに従って行われ，その間に指動脈血圧波形が記録された (3.3.2. 参照)．ただし，WR の増大速度は 10 watt/min に統一された．ウォーミングアップ運動時には 30 秒おきに，ランプ負荷運動時には 20 秒おきに，SBP および HR が両者の同時測定装置 (DPBP system, 旭光物産) を用いて測定された (3.3.3. 参照)．

5.2.2.c. 解析方法

第3章(3.3.2.)に述べた方法により,ウォーミングアップ運動終了直前(ランブ負荷運動開始直前)の定常状態における15秒間の血圧波形から,SACが算出された。また,DPをSACの算出と同時点,すなわちWRが20ワットでの運動時(DP₂₀; Double Product during Exercise at 20 watt)および,WRが50ワットに達した時点(DP₅₀; Double Product during Exercise at 50 watt)で,それぞれ算出した(3.3.3.参照)。また,20ワットでの運動時からWRが50ワットに達する間のDPの変化量(ΔDP₅₀₋₂₀)を算出した。

SVは体格の影響を受けるので,SACは体表面積で補正した¹⁵⁾。体表面積はDu Bois¹⁷⁾の次式により算出した。

$$\text{体表面積} = \text{体重}^{0.425} \times \text{身長}^{0.725} \times 0.00718$$

5.2.2.d. 統計処理

SACを独立変数とし,DP₂₀,DP₅₀およびΔDP₅₀₋₂₀を従属変数として対数曲線による回帰分析を行い,各々の相関係数を算出した。回帰分析は,全被検者で行うとともに,全中高齢者と若齢成人,および危険因子の非保有中高齢者と保有中高齢者とに分けた分析も行った。SACとDP₂₀およびDP₅₀との間に有意の相関関係が認められた群において,DP₂₀とDP₅₀との回帰曲線の傾きの差を,差の分散の不偏推定値で標準化して比較した。中高齢者と若齢成人でそれぞれ有意の相関関係が認められた項目,および危険因子の非保有者と保有者でそれぞれ有意の相関関係が認められた項目において,前述の方法による回帰曲線の傾きの差,およびFisherのrのz変換による相関係数の差を群間で比較した。全中高齢者と若齢成人の比較には対応のないt検定を用いた。危険因子の非保有中高齢者と保有中高齢者および若齢成人の比較には,一元配置分散分析を行い,F値が有意であった項目については,FisherのPLSD法により多重比較検定を行った。測定値は平均±標準偏差で示し,統計学的有意水準は $p < 0.05$ とした。

5.2.3. 結果

SAC および運動時の循環動態を Table 5-2-2 に示す。全中高齢者の SAC は、若齢成人に比べて低値を示した。中高齢者を危険因子の非保有中高齢者および保有中高齢者に分けても、各々の SAC は若齢成人に比べて低値を示した。危険因子の非保有中高齢者の SAC は保有者に比べて高値であったが、統計学的有意差は認められなかった ($p = 0.75$)。DP₂₀ は、全中高齢者で、あるいは危険因子の非保有中高齢者と保有中高齢者に分けても、各々若齢成人に比べて有意の高値を示した。また、統計学的な有意差は認められなかったが、危険因子の非保有中高齢者で保有中高齢者に比べて低値を示した ($p = 0.07$)。DP₅₀ も同様に、全中高齢者、危険因子の非保有中高齢者および保有中高齢者で若齢成人に比べて高値を示し、危険因子の非保有中高齢者で保有中高齢者に比べて有意な低値を示した。ΔDP₅₀₋₂₀ は、全中高齢者および危険因子の保有中高齢者で若齢成人に比べて有意な高値を示し、統計学的な有意差は認められなかったが、非保有中高齢者で若齢成人に比べて高値を示した ($p = 0.07$)。危険因子の非保有中高齢者の ΔDP₅₀₋₂₀ は、保有中高齢者に比べて有意な低値を示した。

全被検者を対象にした回帰分析において、SAC と DP₂₀ ($r = -0.51$, Fig. 5-2-1), DP₅₀ ($r = -0.57$, Fig. 5-2-2) および ΔDP₅₀₋₂₀ ($r = -0.47$, Fig. 5-2-3) との間に、有意の相関関係が認められた。SAC と DP₅₀ との回帰曲線の傾きは、DP₂₀ との曲線の傾きに比べて有意に大きかった。群毎の分析では、SAC と DP₂₀ との間に、全中高齢者 ($r = -0.49$, Fig. 5-2-1), 危険因子の非保有中高齢者 ($r = -0.49$) および保有中高齢者 ($r = -0.48$) においては有意の相関関係が認められたが、若齢成人 ($r = -0.11$, Fig. 5-2-1) においては有意の関連性は認められなかった。SAC と DP₂₀ との回帰曲線の傾きおよび相関係数に、危険因子の非保有中高齢者と保有中高齢者との間に有意差は認められなかった。SAC と DP₅₀ との間にも、全中高齢者 ($r = -0.52$, Fig. 5-2-2), 危険因子の非保有中高齢者 ($r = -0.54$) および保有中高齢者 ($r = -0.48$) においては有意の相関関係が認められたが、若齢成人 ($r = -0.10$, Fig. 5-2-2) においては有意の関連性は認められなかった。

SAC と DP₅₀ との回帰曲線の傾きおよび相関係数に、危険因子の非保有中高齢者と保有中高齢者との間に有意差は認められなかった。SAC と DP₅₀ との回帰曲線の傾きは、DP₂₀ との曲線の傾きに比べて、統計学的に有意ではなかったが、全中高齢者 ($p = 0.06$)、危険因子の非保有中高齢者 ($p = 0.14$) および保有中高齢者 ($p = 0.16$) において大きかった。ただし、SAC と Δ DP₅₀₋₂₀ との間には、全中高齢者 ($r = -0.40$, Fig. 5-2-3)、危険因子の非保有中高齢者 ($r = -0.47$) および保有中高齢者 ($r = -0.34$) と若齢成人 ($r = -0.38$, Fig. 5-2-3) のそれぞれで、有意の相関関係が認められた。SAC と Δ DP₅₀₋₂₀ との回帰曲線の傾きおよび相関係数に、全中高齢者と若齢成人との間、および危険因子の非保有者と保有者との間に有意差は認められなかった。

5.2.4. 考察

全被検者において、SAC と最大下運動時の一定強度における DP との間に有意の相関関係が認められた。また、回帰曲線の傾きは、運動強度が増すと有意に大きくなった。群毎の分析では、全中高齢者、危険因子の非保有中高齢者および保有中高齢者においては有意の相関関係が認められたが、若齢成人においては有意の関連性は認められなかった。ただし、運動強度の増加にともなう DP の増加量と SAC の間には、中高齢者だけでなく若齢成人でも有意な相関関係が認められた。したがって、動脈系コンプライアンスが最大下運動時の心筋酸素摂取量に及ぼす影響は、加齢にともなって大きくなることが示唆された。すなわち、若齢成人では動脈系コンプライアンスが心筋酸素摂取量に及ぼす影響は弱いですが、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど最大下運動時の一定強度における心筋酸素摂取量は増加することが示唆された。

本研究では、動脈系コンプライアンスは最大下運動時の心筋酸素摂取量に有意の影響を及ぼすが、影響の大きさは中高齢者と若齢成人で異なることを示唆する成績が得られた。心筋酸素摂取量は、運動強度が同じであっても、左室後負荷が大きいほど増加すると考えられる。したがって、本研究の成績は、動脈系コンプライアンスが左室後負荷に影響を及ぼすこと、およびその影響は加齢とともに大きくなることを示すと

考えられる。拍動流における左室後負荷を規定する動脈インピーダンスに対して、動脈系コンプライアンスの貢献度は約 10 % であったと報告されているように⁶⁴⁾、一般には、後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は小さいと考えられている。しかしながら、加齢にともなって動脈伸展性が低下する中高齢者^{2,3,36,39,78,85)}では、後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は、約 30 % と大きい¹⁵⁾。第 5 章 5 . 1 . においても、若齢成人では動脈系コンプライアンスが最大下運動時の運動強度の増大にともなう後負荷の増大に及ぼす影響は弱いですが、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど、後負荷の増大は大きくなることが示唆された。本研究の成績は、加齢にともなう動脈系コンプライアンスの低下による左室後負荷の増大が心筋酸素摂取量にも有意の影響を及ぼす可能性を示すと考えられる。

本研究で、中高齢者を冠動脈危険因子（高血圧、高脂血症および高血糖）の有無で分けた検討を行った。危険因子の非保有者の SAC は保有者の SAC より大きかったが、統計学的な有意差は認められなかった。また、それぞれの群で、SAC と DP₂₀ および DP₅₀ との間に有意の相関関係が認められたが、回帰曲線の傾きおよび相関係数に両群間の有意差は認められなかった。すなわち、危険因子非保有者と保有者の間で、動脈系コンプライアンスが最大下運動時の心筋酸素摂取量に及ぼす影響には大きな差が認められなかった。動脈では血圧と容積の関係は線形ではなく、血圧が高いほど一定の容量変化に対する血管内圧の上昇が大きいので、血圧が上昇すれば動脈伸展性は低下する⁶⁰⁾。また、重回帰分析による検討では、コレステロール⁷⁸⁾および血糖⁹⁾は動脈伸展性に独立して影響を及ぼす因子として採用されている。しかし、本研究の対象者からは、危険因子の治療に関連した薬剤の服用者は除外してある。したがって、本研究においては、危険因子保有者においても危険因子が動脈系コンプライアンスに及ぼす影響は、加齢による影響に比べて、おそらく小さかったのであろう。

全被検者において、SAC と DP の回帰曲線の傾きは DP₅₀ で DP₂₀ に比べて大きかった。したがって、動脈系コンプライアンスが心筋酸素摂取量に及ぼす影響は、運動強度の

増大にともなって大きくなると考えられる。運動強度が増大すると CO および動脈血圧も増大し、それにともなって心筋酸素摂取量は増加する。その増加には個人差があると考えられるが、SAC は ΔDP_{50-20} との間にも有意の関連性が認められており、動脈系コンプライアンスが低下するほど、運動強度の増加にともなう心筋酸素摂取量の増加は大きくなることが示唆される。若齢成人では、動脈系コンプライアンスは低下しておらず、また最大下運動時の心筋酸素摂取量に及ぼす影響は小さいと考えられる結果が得られたが、若齢成人の場合にも、SAC と ΔDP_{50-20} との間には有意の関連性が認められており、より高強度の運動時においては、動脈系コンプライアンスが心筋酸素摂取量に有意の影響を及ぼす可能性も考えられる。

運動時の心筋酸素摂取量が大きく、心筋酸素摂取量の増大に見合うだけの酸素供給がなされないと、心ポンプ機能は低下し、それにともなって全身持久性体力も低下する可能性がある。さらに、動脈硬化症の罹患率が高い中高齢者の運動では、運動時の左室後負荷が増大して心筋酸素摂取量が増加すると、虚血発作の危険性は高まる。また、動脈系コンプライアンスが低いと、心拍出量が同一なら脈圧を増大させる。脈圧の増大による冠血流量の減少も、虚血発作の危険性を高める⁶²⁾。一方で、比較的強度の持久性トレーニングや身体活動量の増加により動脈系コンプライアンスないし動脈伸展性は増大することが報告されている^{38,39,79)}ので、動脈系コンプライアンスが小さくても、低い強度でトレーニングを開始し、動脈系コンプライアンスの増大を待って強度を増大させれば、心筋収縮の予備力の増大により全身持久性体力は向上し、同時に運動の危険性は低下することが期待できる。

5.2.5. 要約

動脈系コンプライアンスが低下すると左室後負荷は増大する。後負荷が増大すれば、一定強度における運動時の心筋酸素摂取量は増加すると考えられる。本研究では、動脈系コンプライアンスが低下するほど最大下運動時の一定強度における心筋酸素摂取量は増加するという仮説のもとに、動脈系コンプライアンスの指標である SAC

(Systemic Arterial Compliance) と心筋酸素摂取量の指標である収縮期血圧と心拍数の二重積 (DP; Double Product) との関連性を , 中高齢者と若齢成人で比較しながら検討することを目的にした .

中高齢者 (n = 100) および若齢成人 (n = 36) が , 自転車エルゴメーターによるウォーミングアップ運動 (20 ワット , 4 分間) とランプ負荷運動 (10 ワット / 分) を連続して行い , ウォーミングアップ運動終了時に SAC および DP (DP₂₀; Double Product during Exercise at 20 watt) を測定し , 仕事率が 50 ワットに達した時点にも DP (DP₅₀; Double Product during Exercise at 50 watt) を測定した .

SAC と DP₂₀ との間に , 全被検者 (r = - 0.51) , 全中高齢者 (r = - 0.49) , 危険因子の非保有中高齢者 (r = - 0.49) および保有中高齢者 (r = - 0.48) においては有意の相関関係が認められたが , 若齢成人 (r = - 0.11) においては有意の関連性は認められなかった . SAC と DP₅₀ との間にも , 全被検者 (r = - 0.57) , 全中高齢者 (r = - 0.52) , 危険因子の非保有中高齢者 (r = - 0.54) および保有中高齢者 (r = - 0.48) においては有意の相関関係が認められたが , 若齢成人 (r = - 0.10) においては有意の関連性は認められなかった . これらの結果は , 若齢成人では動脈系コンプライアンスが心筋酸素摂取量に及ぼす影響は弱い , 中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど最大下運動時の一定強度における心筋酸素摂取量は増加することを示唆する .

5.2.6. 結論

動脈系コンプライアンスが低下するほど , 最大下運動時の一定強度における心筋酸素摂取量は増加する , という仮説が検証された .

第6章 動脈系コンプライアンスと最大下運動における全身持久性体力との関連性

6.1. 緒言

動脈系コンプライアンスが小さいほど左室後負荷は大きく¹⁵⁾、心拍出量(CO; Cardiac Output)は少ない¹⁹⁾。心ポンプ機能と全身持久性体力との間には有意の関連性が認められる¹⁸⁾ので、動脈系コンプライアンスは全身持久性体力に有意の影響を及ぼす可能性がある。実際に、動脈系コンプライアンスと最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2MAX}$; Maximal Oxygen Uptake)^{13,43,79)}や漸増負荷運動の持続時間¹⁴⁾との間に有意の正相関が認められている。しかしながら、最大下運動における全身持久性体力と動脈系コンプライアンスの関連性を検討した研究は我々の知る範囲ではない。疲労が比較的軽度で⁸⁸⁾、交感神経系の亢進⁹³⁾や心筋酸素摂取量の急増を認めない^{12,66,80)}運動強度の最大値である換気性閾値(VT; Ventilatory Threshold)と動脈系コンプライアンスとの関連性を検討することの意義は大きい。

左室後負荷への動脈系コンプライアンスの貢献度は一般には小さいと考えられている⁶⁴⁾が、動脈系のコンプライアンス^{56,58,79)}や伸展性^{2,3,36,39,78,85)}は加齢とともに低下するので、中高齢者では大きくなる¹⁵⁾。また、酸素摂取量($\dot{V}O_2$; Oxygen Uptake)が同水準の運動時において、中高齢者では若齢成人に比べてCOが少なく、動静脈酸素較差(A-V O_2 diff; Arteriovenous Oxygen Difference)が大きかったことから、全身持久性体力の加齢による低下には、心ポンプ機能低下の影響が大きいと考えられる⁵⁵⁾。したがって、中高齢者においては、動脈系コンプライアンスの低下による心ポンプ機能の低下が最大下運動における全身持久性体力に有意の影響を及ぼすとしても、若齢成人においても、有意の影響を及ぼすとは限らない。

本研究の目的は、動脈系コンプライアンスがVTにおける $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2VT}$; Oxygen Uptake at Ventilatory Threshold)に及ぼす影響を、中高齢者を対象に若齢成人と比較しながら検討することである。本研究では、1)加齢にともなう動脈系コンプライアンスの低下は、最大下運動における全身持久性体力を制限する、すなわち、中高齢者では動脈

系コンプライアンスが低下するほど最大下運動における全身持久性体力も低下する，
2) 動脈系コンプライアンスが低下していない若齢成人では，動脈系コンプライアンスが最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響は弱い，という仮説を設定した．この仮説を検証するために，中高齢者および若齢成人を対象に運動負荷試験を行い，動脈系コンプライアンスと $\dot{V}O_{2VT}$ との関連性を検討した．

6.2. 方法

6.2.1. 被検者

被検者は46名の中高齢者(53~77歳)および39名の若齢成人(18~33歳)である(Table 6-1)．中高齢者では，運動習慣を持たない被検者は35名，レクリエーションレベルの運動習慣を持つ被検者は11名，若齢成人ではそれぞれ5名および34名であり，高度なトレーニングを行っている被検者はいなかった．実験の開始に先立って行った中高齢者の健康診断では，明らかな疾患が認められた被検者はいなかったが，25名(53~72歳)は動脈硬化危険因子の保有者であると診断された(高血圧， $n=1$ ，収縮期血圧/拡張期血圧146/91 mmHg; 高脂血症， $n=21$ ，総コレステロール220~249 $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$ もしくは中性脂肪150~179 $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$; 高血糖， $n=7$ ，血糖110~126 $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$)．被検者に喫煙習慣を持つ者と，高血圧，高血糖および高脂血症の服薬治療を受けている者は含まれていない．被検者には，実験の内容について十分な説明を行い，実験参加への文書による同意を得た．

6.2.2. 測定項目および測定方法

第3章(3.3.2.~3.3.3.)に述べた方法により，運動負荷試験とその間の $\dot{V}O_2$ および二酸化炭素排泄量の測定と指動脈血圧波形の連続記録が行われた．

6.2.3. 解析方法

第3章(3.3.2.)に述べた方法により，ウォーミングアップ運動終了直前(ランプ負荷運動開始直前)の定常状態における15秒間の血圧波形から，SAC(Systemic Arterial Compliance)が算出された．安静時および運動時の収縮期血圧(SBP; Systolic

Blood Pressure), 拡張期血圧 (DBP; Diastolic Blood Pressure) および心拍数 (HR; Heart Rate) も, 指動脈の波形から算出された (3.3.3. 参照).

最大下運動における全身持久性体力の指標として, V-slope法によりVTを決定して $\dot{V}O_{2VT}$ を求めた (3.3.4. 参照). 心ポンプ機能の指標として, ランプ負荷運動開始1分後からVTに至る間における仕事率 (WR; Work Rate) の増大に対する $\dot{V}O_2$ の増加の比 ($\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$) を算出した (3.3.3. 参照).

$\dot{V}O_2$ およびSVは体格の影響を受けるので, $\dot{V}O_{2VT}$ は体重で補正し, SACは体表面積で補正した¹⁵⁾. 体表面積はDu Bois¹⁷⁾の次式により算出した.

$$\text{体表面積} = \text{体重}^{0.425} \times \text{身長}^{0.725} \times 0.00718$$

6.2.4. 統計処理

中高齢者と若齢成人の比較には, 対応のない *t* 検定を用いた. 各指標間の相関分析は, ピアソンの単相関係数を用いて行った. 相関分析は, 全被検者で行うとともに, 中高齢者と若齢成人とに分けた分析も行った. 測定値は平均 ± 標準偏差で示し, 統計学的有意水準は $p < 0.05$ とした.

6.3. 結果

中高齢者では若齢成人に比べて, SAC (0.85 ± 0.26 vs 1.42 ± 0.26 ml·mmHg⁻¹·m⁻², Fig. 6-1) および $\dot{V}O_{2VT}$ (13.4 ± 2.2 vs 19.1 ± 2.5 ml·kg⁻¹·min⁻¹, Fig. 6-2) はいずれも有意の低値を示した.

SACと $\dot{V}O_{2VT}$ との間に, 全被検者および中高齢者においては有意の正相関が認められたが (それぞれ $r = 0.65$ および $r = 0.46$, Fig. 6-3), 若齢成人においては有意の相関関係は認められなかった ($r = -0.13$, Fig. 6-3). $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ と $\dot{V}O_{2VT}$ の間にも, 全被検者および中高齢者では有意の正相関が認められたが (それぞれ $r = 0.61$ および $r = 0.46$, Fig. 6-4), 若齢成人では有意の関連性は認められなかった ($r = 0.17$, Fig. 6-4).

6.4. 考察

動脈系コンプライアンスないし動脈伸展性と全身持久性体力との関連については,

いくつかの報告がある。Tanaka et al.⁷⁹⁾およびVaitkevicius⁸⁵⁾は、幅広い年齢層の被検者を対象にして、両者間に有意の相関関係が認められることを示した。若齢成人¹³⁾や比較的若い中齢者⁴³⁾においても、動脈系コンプライアンスと $\dot{V}O_{2MAX}$ との間に有意の正相関が認められたことが報告されている。本研究の全被検者においても、SACと $\dot{V}O_{2VT}$ との間に有意の相関関係が認められたが、若齢成人では有意の関連性は認められなかった。動脈系コンプライアンスは最大運動においては全身持久性体力に有意の影響を及ぼすにしても、動脈系コンプライアンスが大きく左室後負荷は小さい若齢成人では、VT以下の運動時の心ポンプ機能に及ぼす影響は弱く、最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響も弱い可能性が考えられる。また、本研究における若齢成人の多くは、レクリエーションレベルの運動習慣を有しているが、高度のトレーニングを行っている者は含まれていない。それに対して、Cameron & Dart¹³⁾の研究では、高度の持久性トレーニング（最高WRの75%）を行い、その前後の測定値をひとまとめにして相関分析が行われている。また、Kingwell et al.⁴³⁾の研究では、高度なトレーニング者（ $\dot{V}O_{2MAX}$; 64.8 ml·kg⁻¹·min⁻¹）と非トレーニング者（同; 40.0 ml·kg⁻¹·min⁻¹）をひとまとめにして相関分析が行われている。すなわち、本研究の若齢成人における検討と先行研究^{13,43)}で一致した見解が得られなかったのは、被検者の体力幅が異なるためである可能性も考えられる。中高齢者のみを対象にした研究では、動脈系コンプライアンスと症候限界性漸増負荷運動の持続時間との間¹⁴⁾や、動脈伸展性と $\dot{V}O_{2MAX}$ ⁷⁸⁾との間に有意の相関関係が認められたことが報告されている。Cameron et al.¹⁴⁾の研究に高度のトレーニング者は含まれていないし、Tanaka et al.⁷⁸⁾の研究ではトレーニング者を除いた検討においても有意の相関が認められている。これらの研究は、中高齢者において、動脈系コンプライアンスは全身持久性運動における最大運動能力に有意の影響を及ぼす可能性を示唆する。最大下運動における全身持久性体力に焦点を当てた本研究においても、高度のトレーニング者を含まない被検者において、SACと $\dot{V}O_{2VT}$ との間に有意の相関関係が認められた。したがって、動脈系コンプライアンスは中高齢者では最大運

動のみならず最大下運動における全身持久性体力にも有意の影響を及ぼすことが示唆された。

動脈系コンプライアンスの動脈インピーダンスに対する貢献度は約 10 % であったと報告されているように⁶⁴⁾、一般には、左室後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は小さいと考えられている。しかしながら、同研究⁶⁴⁾において環状鉤の装着により動脈硬化をシミュレートしたところ、その貢献度は約 20 % にまで増大した。加齢にともなって動脈伸展性は低下する^{2,3,36,39,78,85)}ので、中高齢者では、後負荷に対する動脈系コンプライアンスの貢献度は約 30 % にまで増大する¹⁵⁾。第 5 章 5 . 1 . における検討では、SACはWRの増大に対する動脈エラスタンスの増大の比との間に、中高齢者では有意の負の相関関係が認められた ($r = - 0.36$, Fig. 5-1-5) が、若齢成人では有意の関連性は認められなかった ($r = - 0.15$, Fig. 5-1-5)。また、SACとWRの増大に対するCOの増加の比および $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ との間にも、中高齢者では有意の相関関係が認められたが (それぞれ $r = 0.36$, Fig. 5-1-6 および $r = 0.37$, Fig. 5-1-7)、若齢成人では有意の関連性は認められなかった(それぞれ $r = 0.22$, Fig. 5-1-6 および $r = 0.25$, Fig. 5-1-7)。第 5 章 5 . 2 . においては、SACと 20 ワットでの運動時および 50 ワットでの運動時の二重積との間に、中高齢者では有意の相関関係が認められた (それぞれ $r = - 0.49$, Fig. 5-2-1 および $r = - 0.52$, Fig. 5-2-2) が、若齢成人では有意の関連性は認められなかった (それぞれ $r = - 0.11$, Fig. 5-2-1 および $r = - 0.10$, Fig. 5-2-2)。これらの結果から、若齢成人では動脈系コンプライアンスが最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷および心ポンプ機能の増大に及ぼす影響は弱いが、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど左室後負荷の増大は大きくなり、心ポンプ機能の増大は小さくなることが推察される。本研究において、中高齢者ではSACと $\dot{V}O_{2VT}$ との間に有意の関連性が認められたが、若齢成人では有意の関連性は認められず、若齢成人では動脈系コンプライアンスが最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響は弱いが、中高齢者では有意の影響を及ぼすことが示唆された。前述したよ

うに、動脈系コンプライアンスが運動時の循環動態に及ぼす影響は中高齢者と若齢成人で異なるために、最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響も異なると考えられる。

SACと $\dot{V}O_{2VT}$ との関連性が中高齢者と若齢成人で異なるのは、最大下運動時の循環動態に動脈系コンプライアンスが及ぼす影響が異なることに加えて、最大下運動時の心ポンプ機能と $\dot{V}O_2$ との関連性が異なる可能性も考えられる。安静時、最高WRの30%および60%の運動時において $\dot{V}O_2$ およびCOを測定し、両者の直線回帰式を算出したところ、中高齢者では若齢成人に比べて、同一の $\dot{V}O_2$ におけるCOは少なかった⁵⁵⁾。また、若齢成人(18~31歳)に比べて中高齢者(51~72歳)の $\dot{V}O_{2MAX}$ は40%低く、最大COおよび最大A-V O_2 diffはそれぞれ30%および10%低かった⁶¹⁾。本研究においても、中高齢者では $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ と $\dot{V}O_{2VT}$ との間に有意の関連性が認められたが、若齢成人では有意の関連性は認められなかった。この結果は、加齢にともなう全身持久性体力の低下には心ポンプ機能低下の関与の方がより大きく、全身持久性体力に及ぼす心ポンプ機能の影響は、特に中高齢者で重要である可能性を示唆する。

6.5. 要約

左室後負荷は心ポンプ機能を規定する因子なので、動脈系コンプライアンスは全身持久性体力に影響を及ぼすと考えられる。動脈系コンプライアンスや動脈伸展性が大きいほど最大酸素摂取量も大きいことは、すでに報告されている。しかしながら、最大下運動における全身持久性体力と動脈系コンプライアンスとの関連性を検討した研究はほとんどない。動脈系コンプライアンスが最大下運動における全身持久性体力に影響を及ぼすとしても、その影響は中高齢者と若齢成人で異なる可能性がある。なぜなら、動脈系コンプライアンスや動脈伸展性は加齢にともない低下し、動脈系コンプライアンスの左室後負荷に対する貢献度は増大する可能性があるからである。本研究の目的は、動脈系コンプライアンスが最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響を、中高齢者を対象に若齢成人と比較しながら検討することである。

中高齢者 (n = 46) および若齢成人 (n = 39) を対象に , 指動脈で記録した血圧波形を伝達関数により上腕動脈の波形に変換して SAC (Systemic Arterial Compliance) を算出し , 運動負荷試験により換気性閾値における酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2VT}$; Oxygen Uptake at Ventilatory Threshold) を測定した . 中高齢者では , 若齢成人に比べて SAC (0.85 ± 0.26 vs $1.42 \pm 0.26 \text{ ml} \cdot \text{mmHg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) および $\dot{V}O_{2VT}$ (13.4 ± 2.2 vs $19.1 \pm 2.5 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) はそれぞれ低値を示した . SAC と $\dot{V}O_{2VT}$ との間に , 全被検者 ($r = 0.65$) および中高齢者 ($r = 0.46$) においては有意の正相関が認められたが , 若齢成人 ($r = -0.13$) においては有意の関連性は認められなかった . したがって , 若齢成人では動脈系コンプライアンスが最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響は弱い , 中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど最大下運動における全身持久性体力も低下することが示唆された .

6.6. 結論

動脈系コンプライアンスが低下するほど , 最大下運動における全身持久性体力も低下する , という仮説が検証された .

第7章 動脈系コンプライアンスおよび最大下運動における全身持久性体力に及ぼす中等度の持久性トレーニングの影響

7.1. 緒言

動脈系コンプライアンスおよび全身持久性体力に及ぼす持久性トレーニングの影響を検討したこれまでの研究では、動脈系コンプライアンスないし動脈伸展性と全身持久性体力はそれぞれ増大することが示されている^{13,32,38,68)}。しかしながら、Cameron & Dart¹³⁾の研究におけるトレーニングは強度が比較的強く(75% 最大酸素摂取量)、池上たち³²⁾および佐竹たち⁶⁸⁾の研究におけるトレーニングは量が多い(130分/日)。軽度ないし中等度のトレーニングの効果のみた研究は少数である³⁸⁾。また、動脈系コンプライアンスが全身持久性体力に影響を及ぼすのであれば、持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスが増大すると、心ポンプ機能および全身持久性体力も増大すると考えられるが、柿山たち³⁸⁾の検討では、両者の変化量に関連性は認められなかった。しかしながら、この検討³⁸⁾では、全身持久性体力を多段階漸増運動負荷時の心拍数(HR; Heart Rate)から推定しており、検討の余地は残されている。

本研究の目的は、中高齢者における中等度の持久性トレーニングが動脈系コンプライアンスおよび最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響を検討すること、および持久性トレーニングによる両者の変化量に関連性を検討することである。本研究では、中等度の持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスが増大すると、最大下運動における全身持久性体力も増大するという仮説を設定した。

7.2. 方法

7.2.1. 被検者

被検者は、実験開始前には運動習慣が無く、12週間の持久性トレーニングを最後まで継続し、トレーニング後の測定に参加した9名の中高齢女性(年齢 62.3 ± 1.7 歳、身長 153 ± 3 cm、体重 52.8 ± 4.8 kg; それぞれ平均 \pm 標準偏差)である。被検者には、実験の目的と内容について十分な説明を行い、実験参加への文書による同意を得た。

7.2.2. 測定項目および測定方法

運動負荷試験は第3章(3.3.3.)のプロトコルを用いて行われ、その間に酸素摂取量($\dot{V}O_2$; Oxygen Uptake)および二酸化炭素排泄量の測定(3.3.3.参照)と、指動脈血圧波形の記録が行われた(3.3.2.参照)。

7.2.3. 解析方法

第3章(3.3.2.)に述べた方法により、ウォーミングアップ運動終了直前(ランプ負荷運動開始直前)の定常状態における15秒間の血圧波形から、SAC(Systemic Arterial Compliance)を算出した。安静時および運動時の収縮期血圧(SBP; Systolic Blood Pressure)、拡張期血圧(DBP; Diastolic Blood Pressure)およびHRも、指動脈の波形から算出された(3.3.3.参照)。

最大下運動における全身持久性体力の指標として、換気性閾値(VT; Ventilatory Threshold)における $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2VT}$; Oxygen Uptake at Ventilatory Threshold)を、V-slope法⁵⁾によりVTを決定して求めた(3.3.4.参照)。最大下運動時の心ポンプ機能の指標として、ランプ負荷運動開始1分後からVTに至る間における仕事率(WR; Work Rate)の増大に対する $\dot{V}O_2$ の増加の比($\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$)を算出した(3.3.3.参照)。

$\dot{V}O_2$ およびSVは体格の影響を受けるので、 $\dot{V}O_{2VT}$ は体重で補正し、SACは体表面積で補正した¹⁵⁾。体表面積はDu Bois¹⁷⁾の次式により算出した。

$$\text{体表面積} = \text{体重}^{0.425} \times \text{身長}^{0.725} \times 0.00718$$

7.2.4. 持久性トレーニング方法

被検者はトレーニングの開始前に測定したVTの80%強度に相当するWRで30分/日の自転車ペダリング運動を12週間にわたり5日/週の頻度で行った。5日/週のトレーニングのうち2日/週は実験室において検者の監視下で行い、3日/週は被検者の自宅において検者の監視のない環境で行った。被検者はトレーニングの実施日および実施時間を記録した。トレーニングが進行し、全身持久性体力が増大するにつれて相対的な運動強度が低下すると考えられるので、トレーニング時のHRを耳尖に装着

した HR モニターにより観察し、トレーニング開始時の HR を維持するように自転車エルゴメーターの WR を 1 週間毎に再調整した。

7.2.5. 統計処理

測定値は平均 ± 標準偏差で示した。トレーニング前後における平均値の差の検定には対応のある t 検定を用いた。2 変数間の関連性はピアソンの単相関係数を用いて検討した。統計学的有意水準は $p < 0.05$ とした。

7.3. 結果

被検者の実際のトレーニング頻度は 4.3 (0.9) 回/週であった。Table 7-1 に循環動態および全身持久性体力の持久性トレーニングによる変化を示す。SAC、 $\dot{V}O_{2VT}$ 、および $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ は有意に増大した。SBP および DBP は有意に低下したが、HR に有意な変化は認められなかった。第 6 章で示した SAC と $\dot{V}O_{2VT}$ の散布図 (Fig. 6-3) にトレーニング後の測定値を重ねて、各被検者それぞれの測定値の変化を観察すると、2 名では SAC がほとんど変化しなかったが、残りの 7 名では SAC および $\dot{V}O_{2VT}$ とも増大した (Fig. 7-1)。

SAC の変化率と $\dot{V}O_{2VT}$ の変化率との間 ($r = 0.30$) および $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ の変化率との間 ($r = 0.34$) には、正の相関関係は認められるものの、統計学的に有意ではなかった。

7.4. 考察

本研究において、中高齢者で測定された SAC とランブ負荷運動で測定された $\dot{V}O_{2VT}$ および運動開始から VT に至る間の $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ は、いずれも中等度の持久性トレーニングにより有意に増大した。すなわち、本研究の仮説である「中等度の持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスが増大すると、最大下運動における全身持久性体力も増大する」という仮説に矛盾しない成績が得られた。

相関関係は必ずしも因果関係を保証するとは限らないが、もし、これまでに本研究および先行研究で示された動脈系コンプライアンスと全身持久性体力の相互関連が因果関係であれば、持久性トレーニングにより前者が増大すれば、後者もまた増大する

と考えられる。本研究では、トレーニング介入によりSACおよび $\dot{V}O_{2VT}$ の平均値はいずれも増大し、被検者ごとの変化を観察すると、少数の例外は認められるものの、両指標はともに増大していた。また、 $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ も有意に増大した。ただし、 $\dot{V}O_{2VT}$ および $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ の変化率とSACの変化率との間には有意の相関関係は認められなかった。したがって、持続性トレーニングにより動脈系コンプライアンスと心ポンプ機能が増大して、最大下運動における全身持久性体力も増大するという仮説が成り立つ可能性は大きいとしても、 $\dot{V}O_{2VT}$ および $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ の変化量をSACの変化量で十分に説明することはできなかった。この結果は、トレーニングにともなう最大下運動における全身持久性体力や心ポンプ機能の増大には、動脈系コンプライアンスの増大以外にも関与している因子があるという可能性を示唆するが、本研究では、被検者が少ないので、結論を得るには、今後さらに検討を加える必要があると考えられる。

全身持久性体力に関与する因子としては、動脈系コンプライアンス以外にも、筋における酸素の取り込み・利用能、あるいは末梢循環（末梢血管抵抗）などがある。中高齢女性における9～12週間の持続性トレーニングを行なった先行研究⁷³⁾では、平均で22%の最大酸素摂取量の増加を認め、また、最大運動時の動静脈酸素較差は有意に増大したが、心拍出量に変化は認められなかった。すなわち、短期間の運動トレーニングでは、最大運動時の全身持久性体力の改善の主体は、心ポンプ機能の改善よりも、筋における酸素の取り込み・利用能などの末梢効果であることが示唆される。本研究で示された最大下運動における全身持久性体力の改善においても、末梢効果が関与している可能性は考慮する必要がある。また、一般には、左室後負荷としての寄与は動脈系コンプライアンスよりも末梢血管抵抗の方が大きい⁶⁴⁾とされる。動脈系コンプライアンスが低下している中高齢者においても、運動トレーニングによる末梢血管抵抗の低下が大きく関与している可能性は否定できない。ただし、本研究では被検者が少ないので、結論を得るには、今後さらに検討を加える必要があると考えられる。

トレーニングによるSACの変化には、血圧の変化が関与している可能性も考慮する

必要がある。動脈壁の応力-歪み関係は直線的ではなく、動脈系コンプライアンスの大きさは血管内圧の影響を受ける。すなわち、血圧が下降すれば動脈系コンプライアンスは増大する。したがって、本研究におけるトレーニングにともなうSACの増大には、トレーニング後の血圧降下も影響を及ぼしたと考えられる。本研究では、SACの測定をウォーミングアップ運動終了直前に行なった。この時点の血圧のトレーニング前後における変動は、通常のトレーニング効果として見られる安静時の血圧降下に比較して大きかった（SBP：170→141 mmHg，DBP：89→73 mmHg）。血圧降下が大きかった理由の1つとして考えられるのは、ウォーミングアップによる一過性の動脈系コンプライアンスの変動に及ぼすトレーニングの効果である。一過性の運動により動脈伸展性が増大することは知られている^{42,76)}。もし、このような増大がトレーニングにより促進されれば、ウォーミングアップ終了時の血圧に大きな差が生じうると考えられる。ただし、測定時の被検者の馴れについても考慮する必要はある。すなわち、呼気ガス採取用のマスクなどの測定装置の装着は被検者にかなりの緊張を強いて血圧が上昇する可能性があるので、測定への馴れがトレーニング前後の血圧の差に影響した可能性である。これらについても、今後さらに検討を加える必要がある。

本研究では、中等度で短期間の持続性トレーニングでも、運動習慣を有していなかった中高齢者において動脈系コンプライアンスと最大下運動における全身持久性体力の増大が同時に生じ得ることが示された。加齢にともなう動脈系コンプライアンスの低下には、可逆性もあることが先行研究で示されている。すなわち、動脈の伸展性やコンプライアンスは日常の身体活動量が多いか運動トレーニングを行っている人では高いこと^{39,43,58,79,85)}や、トレーニングにより増大すること^{13,32,38,68,79)}も報告されている。これらのうち、強度の高いトレーニングはしていなくとも日常の身体活動量が多いと動脈伸展性が高いこと³⁹⁾、また、比較的到低強度で短期間のトレーニングでも動脈伸展性が増大したこと³⁸⁾を示す研究があるが、本研究の成績は、これらに一致するものであり、同時に最大下運動における全身持久性体力の増加も示された。

7.5. 要約

持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスと全身持久性体力はそれぞれ増大することが先行研究により示されている。しかしながら、軽度ないし中等度の強度のトレーニングの効果をみた研究は少なく、また、両者の変化量の関連は明らかにされていない。本研究の目的は、中高齢者における中等度の持久性トレーニングが動脈系コンプライアンスおよび最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響を検討すること、および持久性トレーニングによる両者の変化量の関連を検討することである。

9名の運動習慣の無かった健常な中高齢女性が、中等度の持久性トレーニング(80%換気性閾値, 30分/日, 5日/週)を12週間行った。その結果、SAC(Systemic Arterial Compliance)、換気性閾値(VT; Ventilatory Threshold)における酸素摂取量($\dot{V}O_{2VT}$; Oxygen Uptake at Ventilatory Threshold)、およびランブ負荷運動においてVTに至る間における仕事率の増大に対する酸素摂取量の増加の比は、いずれも有意に増大した。また、被検者ごとの変化を観察すると、少数の例外は認められるものの、SACおよび $\dot{V}O_{2VT}$ はともに増大していた。以上の結果は、中等度の持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスおよび最大下運動における全身持久性体力は増大すること、および両者の増大は関連する可能性を示唆する。

7.6. 結論

中等度の持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスが増大すると、最大下運動における全身持久性体力も増大する、という仮説が検証された。

第8章 総合討論

8.1. 本研究で得られた成果

本研究は、中高齢者において動脈系コンプライアンスが全身持久性体力に及ぼす影響を、換気性閾値における酸素摂取量を全身持久性体力の指標として用い、運動時の循環動態および持久性トレーニングと関連させながら明らかにすることを目的とした。第2章の文献研究により明らかになった問題点から、4つの研究課題および仮説を設定し、その検証を行った。

第4章では、動脈系コンプライアンスをより簡便に評価する方法として、SAC (Systemic Arterial Compliance) の算出に必要な動脈血圧波形下面積比を、ポリウムクランプ法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法の有用性と妥当性が示された。アプラネーショントノメトリを用いた従来¹³⁾の方法に比べると、本法は測定に必要な時間、空間および労力が少なく、被検者の血圧が低い場合や皮脂が厚い場合、運動時のように体動をともなう場合にも比較的容易にSACの測定が可能である。動脈系コンプライアンスは加齢とともに低下するので^{56,58,79)}、循環動態を規定する因子としての意義は、とくに中高齢者で重要である¹⁵⁾。我が国では高齢化が急速に進んでおり、より簡便な動脈系コンプライアンスの評価法の有用性と妥当性が示されたことの意義は大きく、その規定因子や、生体にとっての意義、それを維持・増大させるための運動処方等に関わる研究の発展が期待される。本研究においても、動脈系コンプライアンスの評価にはこの方法を用いた。

第5章では、中高齢者および若齢成人を対象に、動脈系コンプライアンスと最大下運動時の循環動態との関連性を検討した。その結果、中高齢者では、若齢成人に比べてSACは小さく、最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大、および一定強度における心筋酸素摂取量は大きいという成績が得られた。また、中高齢者においては、SACが小さいほど左室後負荷の増大および心筋酸素摂取量は大きかった。

したがって、若齢成人では動脈系コンプライアンスが運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大および一定強度における心筋酸素摂取量に及ぼす影響は弱い、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど、左室後負荷の増大および心筋酸素摂取量は大きくなることが示唆された。

左室後負荷は心ポンプ機能の規定因子であり、左室後負荷が大きくなるほど心ポンプ機能は低下する⁸⁶⁾。また、一定強度の心筋酸素摂取量が大きく、心筋酸素摂取量に見合うだけの酸素供給がなされないと、心ポンプ機能が低下する可能性がある。したがって、中高齢者では動脈系コンプライアンスが運動時の心ポンプ機能に有意の影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、動脈系コンプライアンスが心ポンプ機能や循環動態に及ぼす影響についての従来の研究^{19,47,62,63)}は、いずれも手術時や安静時などの限られた条件下で行われている。本研究において、心ポンプ機能の指標である最大下運動時の運動強度の増大にともなう心拍出量の増加および酸素摂取量の増加は、中高齢者で若齢成人に比べて小さく、中高齢者においてはSACが小さいほど、あるいは左室後負荷の増大が大きいほど小さいという成績が得られた。これらの結果から、若齢成人では動脈系コンプライアンスが運動強度の増大にともなう心ポンプ機能の増大に及ぼす影響は弱い、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど心ポンプ機能の増大は小さくなることが示唆された。

動脈系コンプライアンスないし動脈伸展性と全身持久性体力との関連性を検討した先行研究^{13,14,43,58,78,79,85)}では、中高齢者における検討は十分に行われていない。また、いずれの検討においても、焦点は最大運動能力に当てられている。本研究の第6章では、中高齢者の日常生活にとっては最大下運動における全身持久性体力がより重要であると考え、疲労が比較的軽度で⁸⁸⁾、交感神経系の亢進⁹³⁾や心筋酸素摂取量の急増を認めない^{12,66,80)}運動強度の最大値である換気性閾値における酸素摂取量を全身持久性体力の指標に用いて、SACとの関連性を検討した。その結果、若齢成人においてはSACと換気性閾値における酸素摂取量との間に有意の関連性は認められなかったが、中高

齢者においては有意の正相関が認められた。また、換気性閾値における酸素摂取量と運動強度の増大にともなう酸素摂取量の増加との間にも、若齢成人では有意の関連性は認められなかったが、中高齢者では有意の正相関が認められた。したがって、若齢成人では動脈系コンプライアンスが最大下運動における全身持久性体力に及ぼす影響は弱い、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど、最大下運動における全身持久性体力も低下することが示唆された。中高齢者と若齢成人でこれらの関連が異なる理由には、中高齢者では動脈系コンプライアンスが小さく^{56,58,79)}、左室後負荷に対する貢献度が大きいこと¹⁵⁾、および心ポンプ機能が全身持久性体力に及ぼす影響は中高齢者でより大きいこと^{55,61)}が考えられる。

動脈系コンプライアンスが最大下運動における全身持久性体力に有意の影響を及ぼすのであれば、持久性トレーニングにより前者が増大すれば、後者もまた増大すると考えられる。そこで第7章では、中高齢者を対象に中等度の持久性トレーニング実験を行い、この仮説の検証を試みた。トレーニング後には両者はいずれも増大しており、被検者ごとの変化を観察した場合にも、両者は増大する傾向にあった。これらの結果は、動脈系コンプライアンスが低下するほど、最大下運動における全身持久性体力も低下する、という仮説とは矛盾しない。

本研究で得られた結果をまとめると、加齢にともなう動脈系コンプライアンスの低下は、最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大を大きくし、心ポンプ機能の増大を小さくすることで、最大下運動における全身持久性体力を制限すると考えられる。一方で、動脈系コンプライアンスが低下していない若齢成人では、動脈系コンプライアンスが最大下運動時の循環動態および全身持久性体力に及ぼす影響は弱いと考えられる。動脈系コンプライアンスが全身持久性体力に及ぼす影響を、運動時の循環動態と関連させながら検討したのは、我々の知る範囲では本研究が初めてである。本研究により得られた知見は、中高齢者の全身持久性体力を規定する因子や、動脈系コンプライアンスが生体に及ぼす影響を検討する上で有用であり、運動生理学

上興味深いものである。

8.2. 本研究で得られた成果の応用

本研究において、動脈系コンプライアンスが中高齢者よりも大きい若齢成人では、動脈系コンプライアンスが最大下運動時の循環動態や全身持久性体力に及ぼす影響は弱いことが示唆された。第5章および第6章で示した散布図を詳細に観察すると、SACが $1.00 \text{ ml}\cdot\text{mmHg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上の範囲であれば、中高齢者においても、動脈系コンプライアンスが最大下運動時の循環動態や全身持久性体力に及ぼす影響は弱いと解釈することもできる。言い換えると、動脈系コンプライアンスが最大下運動時の循環動態や全身持久性体力に及ぼす影響は、動脈系コンプライアンスが低下している際に顕著になると考えられる。一方、換気性閾値における酸素摂取量の平均値は、本研究の中高齢者（平均64歳）では $13.4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であり、若齢成人（平均24歳）では $19.1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であったが、健常な日本人男女99名（16~70歳）を対象にした研究³³⁾では、64歳の平均値は約 $18.0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であり、24歳の平均値は約 $25.0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であった。この先行研究³³⁾の被検者数は標準値を求めるには必ずしも十分ではなく、被検者の特性に偏りがある可能性は否定できないが、少なくとも、本研究の被検者の全身持久性体力水準は高くはないと考えられる。また、第7章におけるトレーニング開始前の平均値は、 $12.7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であり、第6章における平均値に比べても低値であった。これらのことも、動脈系コンプライアンスが最大下運動時の循環動態や全身持久性体力に及ぼす影響は、中高齢者の中でも、動脈系コンプライアンスや全身持久性体力の低下が顕著な場合に、とくに重要である可能性を裏付ける。

本研究により、中高齢者では動脈系コンプライアンスが低下するほど、最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大、および一定強度における心筋酸素摂取量は大きくなることと、最大下運動における全身持久性体力は低下することが示唆された。運動時の左室後負荷が増大して心筋酸素摂取量が増加すると、虚血発作の危険性は高まる。本研究の結果から、中高齢者のトレーニングを安全に行うために、

動脈系コンプライアンスや全身持久性体力の低下が顕著な場合には、中等度以下の強度でトレーニングを開始し、動脈系コンプライアンスが増大してから強度の高いトレーニングを取り入れることが望ましいと考えられる。

健康の維持・増進や生活習慣病の予防を目的とした運動の普及と実践にとって重要な要素の一つに、運動実践者の動機付けがある。全身持久性体力の低下は日常生活や余暇活動を制限する可能性があるが、動脈系コンプライアンスや最大下運動における全身持久性体力の低下には可逆性があり、中高齢者でも容易に施行できる中等度の持久性トレーニングにより両者は増大することも、本研究により示唆された。本研究の成果を基に、動脈系コンプライアンスを維持・増大することの意義と、それに対する運動の有用性をアピールすることは、運動実践者の動機付けの一助になると考えられる。また、本研究の成果を運動指導者の運動生理学の知識に加えることができれば、より安全で効果的なトレーニングを指導することが可能になるとともに、実践者との信頼関係を構築することも容易になり、実践者の動機付けに貢献する可能性がある。

8.3. 今後の研究課題

中高齢者においては、動脈系コンプライアンスと最大下運動における循環動態および全身持久性体力との間に有意の関連性が認められた。しかしながら、それらの相関係数は必ずしも高い値ではなかった ($r = 0.36 \sim 0.52$)。また、縦断的検討において、動脈系コンプライアンスの変化率と換気性閾値における酸素摂取量の変化率との間に有意の相関関係は認められなかった。文献研究と各章の緒言および考察で述べたように、全身持久性体力は、心ポンプ機能の他に筋での酸素の取り込み・利用能によっても規定される。心ポンプ機能は左室後負荷の他に、前負荷および心筋の収縮能によっても規定され⁸⁶⁾、左室後負荷は動脈系コンプライアンス（主に中心動脈に規定される）の他に、末梢血管抵抗（主に末梢動脈に規定される）によっても規定される¹⁵⁾。すなわち、本研究では最大下運動における循環動態および全身持久性体力を規定する 1 因子を採り上げて検討したために、必ずしも高い相関関係は得られなかったと考えられる。

これに対して、より多くの指標を測定し、共分散構造分析や構造方程式等の多変量を同時に解析する統計学的手法を用いて詳細な検討を行う方法も考えられる。そのためには、対象例数を大幅に増やすこと、とくに本研究で欠けている30～40歳代のデータを追加すること、および中高齢者および若齢者のデータ数もさらに増やすことが必要である。また、動脈系コンプライアンスと末梢血管抵抗の運動時の左室後負荷に対する貢献度を比較することで、中高齢者の全身持久性体力を規定する因子をより詳細に明らかにすることができると思われる。

女性ホルモンであるエストロゲンは、血管拡張性物質である一酸化窒素の合成酵素の発現に関連する²²⁾ことから、動脈系コンプライアンスに影響を及ぼす^{59,87)}と考えられている。したがって、本研究の被検者における性別の偏りが、得られた結果に影響を及ぼした可能性は否定できない。ただし、高齢女性のエストロゲン量は閉経により減少するので、十分な数の被検者のデータを得た後に男女別に分けた検討を行ったとしたら、中高齢者においては本研究と同様の傾向が認められる可能性は大である。また、動脈系コンプライアンスの加齢変化は女性で男性よりも大きいことが報告されており⁸⁷⁾、動脈系コンプライアンスの循環動態や全身持久性体力に対する貢献度の加齢変化には、男女差が認められる可能性が考えられる。しかしながら、本研究において、動脈系コンプライアンスと最大下運動時の循環動態や最大下運動における全身持久性体力との関連性を、男性と女性で比較検討することはできなかった。このことは今後の検討課題として残されている。

8.2. で述べたように、動脈系コンプライアンスには最大下運動時の循環動態や全身持久性体力に及ぼす影響の強弱を分ける閾値が存在する可能性がある。この閾値が明らかになれば実際の運動処方に有用であると考えられるが、そのためにはデータを充実させる必要がある。この閾値は年齢により異なる可能性があるため、年代毎に閾値が異なるか否かを検討し、異なるのであれば年代毎に基準値を設定する必要がある。また、本研究の被検者に高血圧、高脂血症および高血糖の服薬治療者は含まれて

いないが、このような対象者における検討を行うことで、本研究の成果をより広範囲に適用できる可能性がある。

第9章 結論

本研究では，中高齢者において動脈系コンプライアンスが全身持久性体力に及ぼす影響を，換気性閾値における酸素摂取量を全身持久性体力の指標に用いて，運動時の循環動態や持久性トレーニングと関連させながら検討し，以下の結論を得た．

- 1．動脈系コンプライアンスの指標である SAC (Systemic Arterial Compliance) の算出に必要な血圧波形下面積比を，ボリュームクランプ法により指動脈で記録された波形から伝達関数により変換された上腕動脈の波形を用いて算出する方法は有用であり，算出される値は妥当である，という仮説が検証された．
- 2．動脈系コンプライアンスが低下するほど，最大下運動時の運動強度の増大にともなう左室後負荷の増大は大きくなり，心ポンプ機能の増大は小さくなる，という仮説が検証された．また，動脈系コンプライアンスが低下するほど，最大下運動時の一定強度における心筋酸素摂取量は増加する，という仮説が検証された．
- 3．動脈系コンプライアンスが低下するほど，最大下運動における全身持久性体力も低下する，という仮説が検証された．
- 4．中等度の持久性トレーニングにより動脈系コンプライアンスが増大すると，最大下運動における全身持久性体力も増大する，という仮説が検証された．

以上の結果は，中高齢者の全身持久性体力を規定する因子を明らかにする上で，また，中高齢者の健康を維持・増進する方策上に重要な新知見を提供するものである．

謝辞

稿を終えるにあたり，本論文の主査として，修士課程から博士課程にわたり，懇切丁寧なご指導・ご助言を賜りました筑波大学体育科学系教授 松田光生先生に心から感謝致します。また，副査をお引き受け頂き，研究生のころより研究や体育に取り組む姿勢を教えて頂きました筑波大学体育科学系教授 高松薫先生，研究内容に適切なご助言を頂くとともに中高齢者の運動負荷試験にご協力頂きました筑波大学体育科学系助教授 鯨坂隆一先生，統計処理の方法についてのご助言を頂きました筑波大学体育科学系助教授 西嶋尚彦先生にも心から感謝申し上げます。プロジェクト研究に参加する機会を与えて頂きました筑波大学体育科学系講師 久野譜也先生，測定機器の使用方法からデータの解析方法，論文の書き方などについてご教示頂きました筑波大学体育科学系講師 前田清司先生，産業技術総合研究所人間福祉医工学部門 菅原順先生に深謝いたします。最後に，測定にご協力頂きました被検者の皆さま，筑波大学スポーツ医学研究室，SAT プロジェクトの関連研究室，高松研究室の諸兄，両親をはじめ公私にわたり私を支えて下さいました皆さまに心から感謝いたします。

引用文献

- 1) **Andersen P. and Henriksson J.** (1977) Training induced changes in the subgroups of human type II skeletal muscle fibres. *Acta Physiol Scand.* 99: 123-5.
- 2) **Avolio A. P., Chen S. G., Wang R. P., Zhang C. L., Li M. F. and O'Rourke M. F.** (1983) Effects of aging on changing arterial compliance and left ventricular load in a northern Chinese urban community. *Circulation.* 68: 50-8.
- 3) **Avolio A. P., Deng F. Q., Li W. Q., Luo Y. F., Huang Z. D., Xing L. F. and O'Rourke M. F.** (1985) Effects of aging on arterial distensibility in populations with high and low prevalence of hypertension: comparison between urban and rural communities in China. *Circulation.* 71: 202-10.
- 4) **Badenhop D. T., Cleary P. A., Schaal S. F., Fox E. L. and Bartels R. L.** (1983) Physiological adjustments to higher- or lower-intensity exercise in elders. *Med Sci Sports Exerc.* 15: 496-502.
- 5) **Beaver W. L., Wasserman K. and Whipp B. J.** (1986) A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol.* 60: 2020-7.
- 6) **Belz G. G.** (1995) Elastic properties and Windkessel function of the human aorta. *Cardiovasc Drugs Ther.* 9: 73-83.
- 7) **Berry C. L., Greenwald S. E. and Rivett J. F.** (1975) Static mechanical properties of the developing and mature rat aorta. *Cardiovasc Res.* 9: 669-78.
- 8) **Bertel O., Buhler F. R., Kiowski W. and Lutold B. E.** (1980) Decreased Beta-adrenoreceptor responsiveness as related to age, blood pressure, and plasma catecholamines in patients with essential hypertension. *Hypertension.* 2: 130-8.
- 9) **Blacher J., Asmar R., Djane S., London G. M. and Safar M. E.** (1999) Aortic pulse wave velocity as a marker of cardiovascular risk in hypertensive patients. *Hypertension.* 33: 1111-7.
- 10) **Bland J. M. and Altman D. G.** (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet.* 1: 307-10.
- 11) **Bos W. J., van Goudoever J., van Montfrans G. A., van den Meiracker A. H. and Wesseling K. H.** (1996) Reconstruction of brachial artery pressure from noninvasive finger pressure measurements. *Circulation.* 94: 1870-5.
- 12) **Brubaker P. H., Kiyonaga A., Matrazzo B. A., Pollock W. E., Shindo M., Miller H. S. Jr. and Tanaka H.** (1997) Identification of the anaerobic threshold using double product in patients with coronary artery disease. *Am J Cardiol.* 79: 360-2.
- 13) **Cameron J. D. and Dart A. M.** (1994) Exercise training increases total systemic arterial compliance in humans. *Am J Physiol.* 266: H693-701.
- 14) **Cameron J. D., Rajkumar C., Kingwell B. A., Jennings G. L. and Dart A. M.** (1999) Higher systemic arterial compliance is associated with greater exercise time and lower blood pressure in a young older population. *J Am Geriatr Soc.* 47: 653-6.
- 15) **Chemla D., Antony I., Lecarpentier Y. and Nitenberg A.** (2003) Contribution of systemic vascular resistance and total arterial compliance to effective arterial elastance in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 285: H614-20.

- 16) **Coggan A. R., Spina R. J., King D. S., Rogers M. A., Brown M., Nemeth P. M. and Holloszy J. O.** (1992) Skeletal muscle adaptations to endurance training in 60- to 70-yr-old men and women. *J Appl Physiol.* 72: 1780-6.
- 17) **Du Bois D. and Du Bois E. F.** (1989) A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. 1916. *Nutrition.* 5: 303-11; discussion 312-3.
- 18) **Eklblom B. and Hermansen L.** (1968) Cardiac output in athletes. *J Appl Physiol.* 25: 619-25.
- 19) **Elzinga G. and Westerhof N.** (1973) Pressure and flow generated by the left ventricle against different impedances. *Circ Res.* 32: 178-86.
- 20) **Farrell S. W. and Ivy J. L.** (1987) Lactate acidosis and the increase in \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} during incremental exercise. *J Appl Physiol.* 62: 1551-5.
- 21) **Fleg J. L., Schulman S. P., O'Connor F. C., Gerstenblith G., Becker L. C., Fortney S., Goldberg A. P. and Lakatta E. G.** (1994) Cardiovascular responses to exhaustive upright cycle exercise in highly trained older men. *J Appl Physiol.* 77: 1500-6.
- 22) **Garcia-Duran M., de Frutos T., Diaz-Recasens J., Garcia-Galvez G., Jimenez A., Monton M., Farre J., Sanchez de Miguel L., Gonzalez-Fernandez F., Arriero M. D., Rico L., Garcia R., Casado S. and Lopez-Farre A.** (1999) Estrogen stimulates neuronal nitric oxide synthase protein expression in human neutrophils. *Circ Res.* 85: 1020-6.
- 23) **Greenfield J. C.** (1962) Relation between pressure and diameter in the ascending aorta of man. *Circ Res.* 10: 778-81.
- 24) **Gizdulich P., Imholz B. P., van den Meiracker A. H., Parati G. and Wesseling K. H.** (1996) Finapres tracking of systolic pressure and baroreflex sensitivity improved by waveform filtering. *J Hypertens.* 14: 243-50.
- 25) **Gizdulich P., Prentza A. and Wesseling K. H.** (1997) Models of brachial to finger pulse wave distortion and pressure decrement. *Cardiovasc Res.* 33: 698-705.
- 26) **Hagberg J. M., Allen W. K., Seals D. R., Hurley B. F., Ehsani A. A. and Holloszy J. O.** (1985) A hemodynamic comparison of young and older endurance athletes during exercise. *J Appl Physiol.* 58: 2041-6.
- 27) **Hagberg J. M., Coyle E. F., Carroll J. E., Miller J. M., Martin W. H. and Brooke M. H.** (1982) Exercise hyperventilation in patients with McArdle's disease. *J Appl Physiol.* 52: 991-4.
- 28) **Hansen J. E., Casaburi R., Cooper D. M. and Wasserman K.** (1988) Oxygen uptake as related to work rate increment during cycle ergometer exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 57: 140-5.
- 29) **Hansen J. E., Sue D. Y., Oren A. and Wasserman K.** (1987) Relation of oxygen uptake to work rate in normal men and men with circulatory disorders. *Am J Cardiol.* 59: 669-74.
- 30) **長谷川元治** (1970) ヒト大動脈脈波速度に関する基礎的研究. *慈医誌.* 85: 742-760.
- 31) **長谷川元治, 荒井親雄, 竹内光吉, 安部信行, 斉藤光代, 鈴木賢二, 川上治仁** (1987) 生物物理動脈硬化診断法 - 大動脈脈波速度検査法 - . *エレクトロニクス臨床.* 11: 87-98.

- 32) 池上晴夫, 佐竹昌之, 黒川隆志, 丹信介, 杉浦崇夫, 山崎由久 (1983) 身体トレーニングが体組成, 呼吸, 循環系, 血液, 体力などに及ぼす効果 - 30歳前後の男子の場合 - . *体力科学*. 32: 302-9.
- 33) Itoh H., Koike A., Taniguchi K. and Marumo F. (1989) Severity and pathophysiology of heart failure on the basis of anaerobic threshold (AT) and related parameters. *Jpn Circ J*. 53: 146-54.
- 34) Itoh H., Nakamura M., Ikeda C., Yanagisawa E., Hatogai F., Iwadare M. and Taniguchi K. (1992) Changes in oxygen uptake-work rate relationship as a compensatory mechanism in patients with heart failure. *Jpn Circ J*. 56: 504-8.
- 35) Itoh H., Taniguchi K., Koike A. and Doi M. (1990) Evaluation of severity of heart failure using ventilatory gas analysis. *Circulation*. 81: II31-7
- 36) Kakiyama T., Matsuda M. and Koseki S. (1998) Effect of physical activity on the distensibility of the aortic wall in healthy males. *Angiology*. 49: 749-57.
- 37) 柿山哲治, 松田光生, 小関迪 (1995) 運動習慣が大動脈脈波速度に及ぼす影響 - 運動の開始時期および継続時間との関連 - . *日本運動生理学雑誌*. 2: 151-8.
- 38) 柿山哲治, 横山典子, 前田清司, 久野譜也, 高石昌弘, 松田光生 (2001) 6ヶ月の低強度運動トレーニングが中高年女性の大動脈伸展性に及ぼす影響. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 9: 226-33.
- 39) 柿山哲治, 時松陽介, 大澤清二, 小関迪, 松田光生 (1998) 成人男性における運動習慣および大動脈伸展性が収縮期血圧に及ぼす影響 - 大動脈脈波速度による検討 - . *体力科学*. 47: 313-26.
- 40) Kawasaki T., Sasayama S., Yagi S., Asakawa T. and Hirai T. (1987) Non-invasive assessment of the age related changes in stiffness of major branches of the human arteries. *Cardiovasc Res*. 21: 678-87.
- 41) Kelly R. P., Ting C. T., Yang T. M., Liu C. P., Maughan W. L., Chang M. S. and Kass D. A. (1992) Effective arterial elastance as index of arterial vascular load in humans. *Circulation*. 86: 513-21.
- 42) Kingwell B. A., Berry K. L., Cameron J. D., Jennings G. L. and Dart A. M. (1997) Arterial compliance increases after moderate-intensity cycling. *Am J Physiol*. 273: H2186-91
- 43) Kingwell B. A., Cameron J. D., Gillies K. J., Jennings G. L. and Dart A. M. (1995) Arterial compliance may influence baroreflex function in athletes and hypertensives. *Am J Physiol*. 268: H411-8.
- 44) Kingwell B. A., Waddell T. K., Medley T. L., Cameron J. D. and Dart A. M. (2002) Large artery stiffness predicts ischemic threshold in patients with coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol*. 40: 773-9.
- 45) Kitamura K., Jorgensen C. R., Gobel F. L., Taylor H. L. and Wang Y. (1972) Hemodynamic correlates of myocardial oxygen consumption during upright exercise. *J Appl Physiol*. 32: 516-22.
- 46) Koike A., Itoh H., Taniguchi K. and Hiroe M. (1989) Detecting abnormalities in left ventricular function during exercise by respiratory measurement. *Circulation*. 80: 1737-46.

- 47) **Kolh P., D'Orio V., Lambermont B., Gerard P., Gommaes C. and Limet R.** (2000) Increased aortic compliance maintains left ventricular performance at lower energetic cost. *Eur J Cardiothorac Surg.* 17: 272-8.
- 48) **Kuecherer H. F., Just A. and Kirchheim H.** (2000) Evaluation of aortic compliance in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 278: H1411-3.
- 49) **Liu Z., Brin K. P. and Yin F. C.** (1986) Estimation of total arterial compliance: an improved method and evaluation of current methods. *Am J Physiol.* 251: H588-600.
- 50) **Luscher T. F. and Tanner F. C.** (1993) Endothelial regulation of vascular tone and growth. *Am J Hypertens.* 6: 283S-93S.
- 51) **Maeda S., Miyauchi T., Kakiyama T., Sugawara J., Iemitsu M., Irukayama-Tomobe Y., Murakami H., Kumagai Y., Kuno S. and Matsuda M.** (2001) Effects of exercise training of 8 weeks and detraining on plasma levels of endothelium-derived factors, endothelin-1 and nitric oxide, in healthy young humans. *Life Sci.* 69: 1005-16.
- 52) **Maeda S., Tanabe T., Miyauchi T., Otsuki T., Sugawara J., Iemitsu M., Kuno S., Ajisaka R., Yamaguchi I. and Matsuda M.** (2003) Aerobic exercise training reduces plasma endothelin-1 concentration in older women. *J Appl Physiol.* 95: 336-41.
- 53) **Matsuda M., Nosaka T., Sato M., Iijima J., Ohshima N. and Fukushima H.** (1989) Effects of exercise training on biochemical and biomechanical properties of rat aorta. *Angiology.* 40: 51-8.
- 54) **Matsuda M., Nosaka T., Sato M. and Ohshima N.** (1993) Effects of physical exercise on the elasticity and elastic components of the rat aorta. *Eur J Appl Physiol.* 66: 122-6.
- 55) **McElvaney G. N., Blackie S. P., Morrison N. J., Fairbairn M. S., Wilcox P. G. and Pardy R. L.** (1989) Cardiac output at rest and in exercise in elderly subjects. *Med Sci Sports Exerc.* 21: 293-8.
- 56) **McVeigh G. E., Bratteli C. W., Morgan D. J., Alinder C. M., Glasser S. P., Finkelstein S. M. and Cohn J. N.** (1999) Age-related abnormalities in arterial compliance identified by pressure pulse contour analysis: aging and arterial compliance. *Hypertension.* 33: 1392-8.
- 57) **Miyauchi T., Yanagisawa M., Iida K., Ajisaka R., Suzuki N., Fujino M., Goto K., Masaki T. and Sugishita Y.** (1992) Age- and sex-related variation of plasma endothelin-1 concentration in normal and hypertensive subjects. *Am Heart J.* 123: 1092-3.
- 58) **Mohiaddin R. H., Underwood S. R., Bogren H. G., Firmin D. N., Klipstein R. H., Rees R. S. and Longmore D. B.** (1989) Regional aortic compliance studied by magnetic resonance imaging: the effects of age, training, and coronary artery disease. *Br Heart J.* 62: 90-6.
- 59) **Moreau K. L., Donato A. J., Seals D. R., DeSouza C. A. and Tanaka H.** (2003) Regular exercise, hormone replacement therapy and the age-related decline in carotid arterial compliance in healthy women. *Cardiovasc Res.* 57: 861-8.
- 60) **Nichols W. W. and O'Rourke M. F.** (1998) McDonald's blood flow in arteries. Theoretical, experimental and clinical principles. 4th ed, London, Arnold.
- 61) **Ogawa T., Spina R. J., Martin W. H., 3rd, Kohrt W. M., Schechtman K. B., Holloszy J. O. and Ehsani A. A.** (1992) Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise. *Circulation.* 86: 494-503.

- 62) **Ohtsuka S., Kakihana M., Watanabe H., Enomoto T., Ajisaka R. and Sugishita Y.** (1996) Alterations in left ventricular wall stress and coronary circulation in patients with isolated systolic hypertension. *J Hypertens.* 14: 1349-55.
- 63) **Ohtsuka S., Kakihana M., Watanabe H. and Sugishita Y.** (1994) Chronically decreased aortic distensibility causes deterioration of coronary perfusion during increased left ventricular contraction. *J Am Coll Cardiol.* 24: 1406-14.
- 64) **O'Rourke M. F.** (1967) Steady and pulsatile energy losses in the systemic circulation under normal conditions and in simulated arterial disease. *Cardiovasc Res.* 1: 313-26.
- 65) **Paterson D. H., Cunningham D. A., Koval J. J. and St Croix C. M.** (1999) Aerobic fitness in a population of independently living men and women aged 55-86 years. *Med Sci Sports Exerc.* 31: 1813-20.
- 66) **Riley M., Maehara K., Porszasz J., Engelen M. P., Bartstow T. J., Tanaka H. and Wasserman K.** (1997) Association between the anaerobic threshold and the break-point in the double product/work rate relationship. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 75: 14-21
- 67) **Safar M. E., Levy B. I., Laurent S. and London G. M.** (1990) Hypertension and the arterial system: clinical and therapeutic aspects. *J Hypertens Suppl.* 8: S113-9.
- 68) **佐竹昌之, 姜熙成, 後藤真二, 池上晴夫** (1987) 身体トレーニングが体組成, 循環機能, 血液性状及び体力に及ぼす効果 - 40歳前後の男子の場合 -. *いばらき健康・スポーツ科学.* 2: 17-23.
- 69) **Schmidt-Trucksass A., Schmid A., Brunner C., Scherer N., Zach G., Keul J. and Huonker M.** (2000) Arterial properties of the carotid and femoral artery in endurance-trained and paraplegic subjects. *J Appl Physiol.* 89: 1956-63.
- 70) **Seals D. R., Hagberg J. M., Hurley B. F., Ehsani A. A. and Holloszy J. O.** (1984) Endurance training in older men and women. I. Cardiovascular responses to exercise. *J Appl Physiol.* 57: 1024-9.
- 71) **白川幹郎** (1974) 脈波速度による臓器動脈硬化の推定. *慈医誌.* 89: 62-77.
- 72) **Sidney K. H. and Shephard R. J.** (1978) Frequency and intensity of exercise training for elderly subjects. *Med Sci Sports.* 10: 125-31.
- 73) **Spina R. J., Ogawa T., Kohrt W. M., Martin W. H., 3rd, Holloszy J. O. and Ehsani A. A.** (1993) Differences in cardiovascular adaptations to endurance exercise training between older men and women. *J Appl Physiol.* 75: 849-55.
- 74) **Stainsby W. N., Sumners C. and Andrew G. M.** (1984) Plasma catecholamines and their effect on blood lactate and muscle lactate output. *J Appl Physiol.* 57: 321-5.
- 75) **Stergiopoulos N., Segers P. and Westerhof N.** (1999) Use of pulse pressure method for estimating total arterial compliance in vivo. *Am J Physiol.* 276: H424-8.
- 76) **Sugawara J., Otsuki T., Tanabe T., Maeda S., Kuno S., Ajisaka R. and Matsuda M.** (2003) The effects of low-intensity single-leg exercise on regional arterial stiffness. *Japanese Journal of Physiol.* 53: 239-41.

- 77) Sugawara J., Tanabe T., Miyachi M., Yamamoto K., Takahashi K., Iemitsu M., Homma S., Seiji M., Ajisaka R. and Matsuda M. (in press) Non-invasive assessment of cardiac output during exercise in healthy young humans. *Acta Physiol Scand*.
- 78) Tanaka H., DeSouza C. A. and Seals D. R. (1998) Absence of age-related increase in central arterial stiffness in physically active women. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 18: 127-32.
- 79) Tanaka H., Dinunno F. A., Monahan K. D., Clevenger C. M., DeSouza C. A. and Seals D. R. (2000) Aging, habitual exercise, and dynamic arterial compliance. *Circulation*. 102: 1270-5.
- 80) Tanaka H., Kiyonaga A., Terao Y., Ide K., Yamauchi M., Tanaka M. and Shindo M. (1997) Double product response is accelerated above the blood lactate threshold. *Med Sci Sports Exerc*. 29: 503-8.
- 81) Tanaka K., Matsuura Y., Matsuzaka A., Hirakoba K., Kumagai S., Sun S. O. and Asano K. (1984) A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med Sci Sports Exerc*. 16: 278-82.
- 82) Tanaka K., Watanabe H., Konishi Y., Mitsuzono R., Sumida S., Tanaka S., Fukuda T. and Nakadomo F. (1986) Longitudinal associations between anaerobic threshold and distance running performance. *Eur J Appl Physiol*. 55: 248-52.
- 83) 田中喜代次 (2000) 全身持久性体力の測定. 体育学研究. 45: 679-94.
- 84) Toprakci M., Ozmen D., Mutaf I., Turgan N., Parildar Z., Habif S., Guner I. and Bayindir O. (2000) Age-associated changes in nitric oxide metabolites nitrite and nitrate. *Int J Clin Lab Res*. 30: 83-5.
- 85) Vaitkevicius P. V., Fleg J. L., Engel J. H., O'Connor F. C., Wright J. G., Lakatta L. E., Yin F. C. and Lakatta E. G. (1993) Effects of age and aerobic capacity on arterial stiffness in healthy adults. *Circulation*. 88: 1456-62.
- 86) von Spiegel T., Wietasch G. and Hoeft A. (1998) Basics of myocardial pump function. *Thorac Cardiovasc Surg*. 46 Suppl 2: 237-41.
- 87) Waddell T. K., Dart A. M., Gatzka C. D., Cameron J. D. and Kingwell B. A. (2001) Women exhibit a greater age-related increase in proximal aortic stiffness than men. *J Hypertens*. 19: 2205-12.
- 88) Wasserman K. (1984) The anaerobic threshold measurement to evaluate exercise performance. *Am Rev Respir Dis*. 129: S35-40.
- 89) Wesseling K. H., Jansen J. R., Settels J. J. and Schreuder J. J. (1993) Computation of aortic flow from pressure in humans using a nonlinear, three-element model. *J Appl Physiol*. 74: 2566-73.
- 90) Wesseling K. H., Settels J. J., van der Hoeven G. M., Nijboer J. A., Butijn M. W. and Dorlas J. C. (1985) Effects of peripheral vasoconstriction on the measurement of blood pressure in a finger. *Cardiovasc Res*. 19: 139-45.
- 91) Westerhof B. E., Guelen I., Parati G., Groppelli A., van Montfrans G. A., Wieling W., Wesseling K. H. and Bos W. J. (2002) Variable day/night bias in 24-h non-invasive finger pressure against intrabrachial artery pressure is removed by waveform filtering and level correction. *J Hypertens*. 20: 1981-6.

- 92) **Wilmore J. H., Stanforth P. R., Gagnon J., Rice T., Mandel S., Leon A. S., Rao D. C., Skinner J. S. and Bouchard C.** (2001) Cardiac output and stroke volume changes with endurance training: the HERITAGE Family Study. *Med Sci Sports Exerc.* 33: 99-106.
- 93) **Yamamoto Y., Hughson R. L. and Peterson J. C.** (1991) Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis. *J Appl Physiol.* 71: 1136-42.
- 94) **吉村正蔵, 長谷川元治, 中山淑, 八木晋一, 林知己夫** (1978) 動脈硬化に関する研究 - 脈波速度による大動脈硬化の定量的評価と病態について - . *脈管学.* 18: 863-70.
- 95) **Yu S. Y. and Blumenthal H. T.** (1963) The calcification of elastic fibers.I. Biochemical Studies. *J Gerontol.* 18: 119-26.
- 96) **Zoll J., Sanchez H., N'Guessan B., Ribera F., Lampert E., Bigard X., Serrurier B., Fortin D., Geny B., Veksler V., Ventura-Clapier R. and Mettauer B.** (2002) Physical activity changes the regulation of mitochondrial respiration in human skeletal muscle. *J Physiol.* 543: 191-200.

付記

筆者の研究業績を以下に示す

原著論文

- 1) Otsuki T., Sugawara J., Tanabe T., Seiji M., Ajisaka R. & Matsuda M. (2003) Simple and noninvasive estimate of systemic arterial compliance by using peripheral arterial blood pressure waveform in elderly people. *Int Journal of Sport and Health Science*. 1: 136-41.
- 2) Otsuki T., Sugawara J., Tanabe T., Seiji M., Ajisaka R. & Matsuda M. (2003) Noninvasive estimate of systemic arterial compliance by using peripheral arterial blood pressure waveform during light exercise in elderly people. *Int Journal of Sport and Health Science*. 1: 142-7.
- 3) 大槻毅, 菅原順, 田辺匠, 前田清司, 久野譜也, 鰐坂隆一, 松田光生 (2003) 中高齢女性の全身持久性体力に及ぼす動脈系コンプライアンスの影響 - 横断的および縦断的研究 -. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 20: 543-51
- 3) 大槻毅, 菅原順, 田辺匠, 前田清司, 久野譜也, 鰐坂隆一, 松田光生 . 動脈系コンプライアンスを評価するための簡便で非侵襲的な動脈血圧波形の記録法 : 若年成人において末梢動脈血圧波形を用いる方法の妥当性. (印刷中)

学会発表

- 1) Otsuki T., Sugawara J., Tanabe T., Maeda S., Ajisaka R. & Matsuda M. (2003) Noninvasive estimate of systemic arterial compliance by using peripheral arterial pressure waveform. The 50th Annual Meeting of the American College of Sports Medicine. San Francisco
- 2) 大槻毅, 菅原順, 気仙有実子, 田辺匠, 前田清司, 久野譜也, 鰐坂隆一, 松田光生 (2003) 動脈系コンプライアンスの加齢変化と運動中の左室後負荷 - SAT project 133 -. 第 58 回日本体力医学会大会. 静岡

- 3) 大槻毅, 気仙有実子, 横山典子, 田辺匠, 菅原順, 前田清司, 久野譜也, 鯨坂隆一, 松田光生 (2003) 中高齢者における運動中の心筋酸素摂取量と動脈系コンプライアンスとの関連 - SAT プロジェクト 100 - . 日本体育学会第 54 回大会. 熊本
- 4) 大槻毅, 菅原順, 気仙有実子, 田辺匠, 前田清司, 久野譜也, 鯨坂隆一, 松田光生 (2003) 動脈系コンプライアンスと全身持久性体力との関連 - 若齢者と中高齢者の比較検討 - (SATproject 104). 第 11 回日本運動生理学会. 名古屋
- 5) 大槻毅, 菅原順, 倉内正則, 田辺匠, 前田清司, 鯨坂隆一, 松田光生 (2002) 中心動脈のコンプライアンスの非侵襲的測定 - volume clamp 法と tonometry 法の比較 - . 第 57 回日本体力医学会大会. 高知
- 6) 大槻毅, 菅原順, 田辺匠, 前田清司, 久野譜也, 鯨坂隆一, 松田光生 (2002) 運動時における中心動脈のコンプライアンスの非侵襲的測定 - volume clamp 法と tonometry 法の比較 - . 日本体育学会第 53 回大会. さいたま
- 7) 大槻毅, 菅原順, 田辺匠, 前田清司, 久野譜也, 鯨坂隆一, 松田光生 (2002) 中高齢女性における有気的運動トレーニングにより中心動脈のコンプライアンスと有気的持久力は増大する - SAT プロジェクト 94 - . 第 13 回日本臨床スポーツ医学会学術集会. 名古屋
- 8) 大槻毅, 菅原順, 田辺匠, 前田清司, 久野譜也, 鯨坂隆一, 松田光生 (2001) 中高齢者における動脈系コンプライアンスと有気的持久力との関係 - SAT プロジェクト 38 - . 日本体育学会第 52 回大会. 札幌
- 9) 大槻毅, 菅原順, 田辺匠, 前田清司, 久野譜也, 鯨坂隆一, 松田光生 (2001) 動脈系コンプライアンスとランブ負荷運動中の心拍出動態との関連 - SAT プロジェクト 66 - . 第 12 回日本臨床スポーツ医学会学術集会. つくば

Table 4-1-1 Characteristics and hemodynamics of subjects.

		Elderly Subjects		Young Subjects	
		Male	Female	Male	Female
		n = 16	n = 31	n = 23	n = 17
Age	(years)	69.4 (6.1)	64.1 (5.5)	25.3 (2.3)	25.6 (2.7)
Height	(cm)	164 (3)	152 (4)	170 (4)	161 (5)
Weight	(kg)	60.9 (5.9)	54.4 (5.2)	70.8 (6.6)	55.8 (7.1)
SBP	(mmHg)	133 (26)	125 (16)	120 (11)	115 (9)
DBP	(mmHg)	79 (13)	74 (9)	74 (9)	65 (9)
HR	(bpm)	65 (12)	65 (9)	64 (8)	62 (8)

Values are Mean (S.D.)

Table 4-2-1 Characteristics and hemodynamics of the elderly subjects.

				n (rate)	Rest	Exercise	t - Value
Age (years)	Male	FR	10 (91 %)	69.1 (5.7)	-	-	
		PR	1 (9 %)	66.0 (-)	-	-	
	Female	FR	4 (36 %)	65.8 (6.6)	-	-	
		PR	7 (64 %)	67.4 (5.0)	-	-	
Height (cm)	Male	FR	10 (91 %)	164 (4)	-	-	
		PR	1 (9 %)	166 (-)	-	-	
	Female	FR	4 (36 %)	150 (3)	-	-	
		PR	7 (64 %)	150 (4)	-	-	
Weight (kg)	Male	FR	10 (91 %)	59.7 (3.5)	-	-	
		PR	1 (9 %)	59.4 (-)	-	-	
	Female	FR	4 (36 %)	58.5 (6.2)	-	-	
		PR	7 (64 %)	55.8 (7.9)	-	-	
SBP (mmHg)	Male	FR	10 (91 %)	123 (19)	157* (23)	10.5	
		PR	1 (9 %)	114 (-)	149 (-)	-	
	Female	FR	4 (36 %)	132 (14)	171 (17)	3.1	
		PR	7 (64 %)	126 (25)	162* (31)	5.5	
DBP (mmHg)	Male	FR	10 (91 %)	69 (9)	79* (8)	7.0	
		PR	1 (9 %)	69 (-)	75 (-)	-	
	Female	FR	4 (36 %)	61 (6)	75* (6)	4.0	
		PR	7 (64 %)	64 (9)	76* (10)	3.6	
HR (bpm)	Male	FR	10 (91 %)	69 (16)	83* (13)	8.9	
		PR	1 (9 %)	60 (-)	75 (-)	-	
	Female	FR	4 (36 %)	59 (9)	88* (8)	3.6	
		PR	7 (64 %)	62 (5)	86* (13)	7.1	
% HRR (%)	Male	FR	10 (91 %)	0.0 (0.0)	17.6* (4.6)	12.1	
		PR	1 (9 %)	0.0 (0.0)	16.0 (-)	-	
	Female	FR	4 (36 %)	0.0 (0.0)	28.7* (13.4)	4.3	
		PR	7 (64 %)	0.0 (0.0)	28.1* (13.2)	5.6	

FR, subjects in whom favorable record of carotid arterial blood pressure waveform was obtained; PR, subjects in whom poor record of carotid arterial blood pressure waveform was obtained; *, $p < 0.05$ vs rest; values are mean (S.D.).

Table 4-2-2 Characteristics and hemodynamics of the young subjects.

				n (rate)	Rest	Exercise	t - Value
Age (years)	Male	FR	11 (100 %)	25.2 (2.1)	-	-	
		PR	0 (0 %)	-	-	-	
	Female	FR	8 (73 %)	24.9 (2.0)	-	-	
		PR	3 (27 %)	22.7 (0.6)	-	-	
Height (cm)	Male	FR	11 (100 %)	170 (4)	-	-	
		PR	0 (0 %)	-	-	-	
	Female	FR	8 (73 %)	160 (6)	-	-	
		PR	3 (27 %)	163 (6)	-	-	
Weight (kg)	Male	FR	11 (100 %)	69.2 (5.5)	-	-	
		PR	0 (0 %)	-	-	-	
	Female	FR	8 (73 %)	55.3 (6.4)	-	-	
		PR	3 (27 %)	56.2 (4.9)	-	-	
SBP (mmHg)	Male	FR	11 (100 %)	115 (8)	121* (8)	3.8	
		PR	0 (0 %)	-	-	-	
	Female	FR	8 (73 %)	118 (15)	132* (13)	4.2	
		PR	3 (27 %)	110 (11)	115* (12)	5.4	
DBP (mmHg)	Male	FR	11 (100 %)	67 (7)	69 (6)	2.1	
		PR	0 (0 %)	-	-	-	
	Female	FR	8 (73 %)	63 (7)	71* (8)	3.6	
		PR	3 (27 %)	61 (6)	61 (10)	0.2	
HR (bpm)	Male	FR	11 (100 %)	64 (6)	82* (6)	8.9	
		PR	0 (0 %)	-	-	-	
	Female	FR	8 (73 %)	65 (9)	88* (8)	10.3	
		PR	3 (27 %)	68 (10)	88 (9)	2.7	
% HRR (%)	Male	FR	11 (100 %)	0.0 (0.0)	13.8* (4.8)	9.6	
		PR	0 (0 %)	-	-	-	
	Female	FR	8 (73 %)	0.0 (0.0)	17.8* (4.4)	11.4	
		PR	3 (27 %)	0.0 (0.0)	14.7 (9.4)	2.7	

FR, subjects in whom favorable record of carotid arterial blood pressure waveform was obtained; PR, subjects in whom poor record of carotid arterial blood pressure waveform was obtained; *, $p < 0.05$ vs rest; values are mean (S.D.).

Table 5-1-1 Characteristics and hemodynamics of subjects.

	Elderly Subjects	Young Subjects	t - Value
Male / Female	7 / 29	27 / 12	
Age (years)	63.4 (3.7)	24.2* (2.7)	- 53.2
Height (cm)	154 (7)	169* (7)	9.0
Weight (kg)	55.9 (7.3)	63.5* (9.5)	3.9
SBP_{REST} (mmHg)	126 (15)	108* (11)	- 6.0
DBP_{REST} (mmHg)	73 (8)	62* (8)	- 5.8
HR_{REST} (bpm)	69 (10)	67 (12)	- 0.6
SBP_{W-up} (mmHg)	164 (21)	128* (14)	- 8.9
DBP_{W-up} (mmHg)	83 (11)	74* (9)	- 4.3
HR_{W-up} (bpm)	87 (14)	85 (12)	- 0.6

W-up, just before the end of warming up exercise; *, p < 0.05 vs the elderly subjects; values are mean (S. D.).

Table 5-2-1 Characteristics and hemodynamics at rest.

	M / F	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	SBP (mmHg)	DBI (mmHg)
Elderly Subjects	22 / 78	64.9 (6.8)	154 (7)	54.6 (7.0)	125 (16)	76
without RF	14 / 36	64.8 (7.2)	155 (7)	54.6 (7.7)	120 (14)	73
with RF	8 / 42	65.1 (6.5)	152 (6)^b	54.7 (6.2)	129 (17)^b	78
Young Subjects	12 / 24	21.5 (2.7)^{a,b,c}	162 (8)^{a,b,c}	57.7 (10.8)	114 (13)^{a,c}	67
<i>t</i> - Value (Elderly, Young)		- 37.3	6.4	2.0	- 8.3	- 2.
F - Value (without RF, with RF, Young)		690	23	2	12	18

RF, coronary arterial risk factors; ^a, $p < 0.05$ vs the all elderly subjects; ^b, $p < 0.05$ vs the elderly subjects w
^c, $p < 0.05$ vs the subjects with risk factors; values are mean (S. D.).

Table 5-2-2 Hemodynamics during exercise.

	M / F	SAC (ml · mmHg ⁻¹ · m ⁻²)	SBP ₂₀ (mmHg)	HR ₂₀ (bpm)	DP ₂₀ (mmHg · bpm)	SBP ₅₀ (mmHg)	HR ₅₀ (bpm)	DP ₅₀ (mmHg · b
Elderly Subjects	22 / 78	0.93 (0.26)	144 (20)	88 (12)	12,766 (2,924)	164 (25)	104 (15)	17,213 (4,
without RF	14 / 36	0.95 (0.29)	139 (19)	88 (13)	12,286 (2,847)	156 (27)	101 (16)	16,146 (4,
with RF	8 / 42	0.91 (0.23)	148 (21)^b	89 (12)	13,247 (2,950)	171 (25)^b	106 (15)	18,280 (4
Young Subjects	12 / 24	1.27 (0.20)^{a,b,c}	120 (14)^{a,b,c}	89 (12)	10,647 (1,904)^{a,b,c}	132 (16)^{a,b,c}	103 (12)	13,642 (2
t - Value (Elderly, Young)		7.1	- 6.6	0.1	- 4.0	- 7.0	- 0.2	- 4.4
F - Value (without RF, with RF, Young)		25.1	24.9	0.2	9.9	30.1	1.4	13.7

RF, risk factors; ^a, *p* < 0.05 vs the all elderly subjects; ^b, *p* < 0.05 vs the elderly subjects without risk factors; ^c, *p* < 0.05 vs the subjects with mean (S. D.).

Table 6-1 Characteristics and hemodynamics of subjects.

	Elderly Subjects	Young Subjects	<i>t</i> - Value
Male / Female	9 / 37	27 / 12	
Age (years)	63.6 (4.6)	24.2* (2.7)	- 47.1
Height (cm)	154 (7)	169* (7)	9.5
Weight (kg)	55.4 (7.1)	63.5* (9.5)	4.5
SBPREST (mmHg)	126 (15)	108* (11)	- 6.2
DBPREST (mmHg)	73 (8)	62* (8)	- 6.6
HRREST (bpm)	68 (10)	67 (12)	- 0.9
SBPW-up (mmHg)	166 (20)	128* (14)	- 9.9
DBPW-up (mmHg)	84 (11)	74* (9)	- 4.8
HRW-up (bpm)	88 (14)	85 (12)	- 1.1

W-up, just before the end of warming up exercise; *, $p < 0.05$ vs the elderly subjects; values are mean (S. D.).

Table 7-1 Effects of exercise training.

		Pre Training	Post Training	<i>t</i> - Value
		n = 9	n = 9	
SBPREST	(mmHg)	124 (12)	111* (14)	- 3.1
DBPREST	(mmHg)	75 (8)	65* (7)	- 3.2
HRREST	(bpm)	71 (14)	72 (12)	0.3
SBPW-up	(mmHg)	170 (22)	141* (15)	- 4.9
DBPW-up	(mmHg)	89 (8)	73* (7)	- 8.7
HRW-up	(bpm)	92 (20)	86 (13)	- 2.1
SAC	(ml·mmHg ⁻¹ ·m ⁻²)	0.74 (0.10)	1.00* (0.21)	4.4
VO₂VT	(ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	12.7 (0.9)	15.2* (1.2)	6.8
VO₂/ WR	(ml·min ⁻¹ ·watt ⁻¹)	7.9 (0.8)	8.7* (0.4)	4.0

W-up, just before the end of warming up exercise; *, *p* < 0.05 vs pre training; values are mean (S. D.).

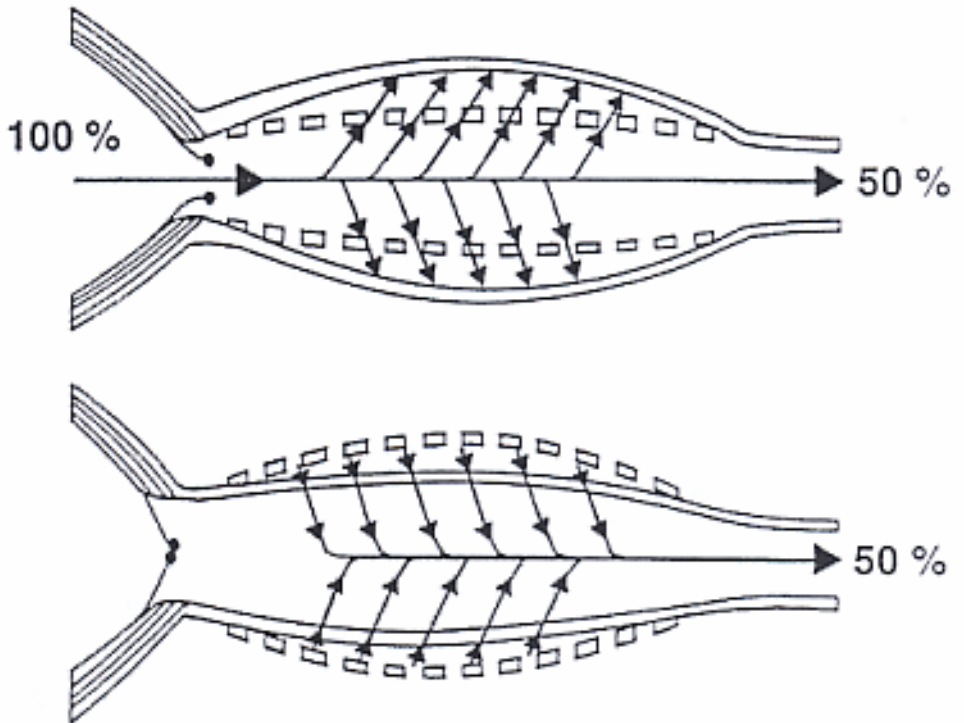
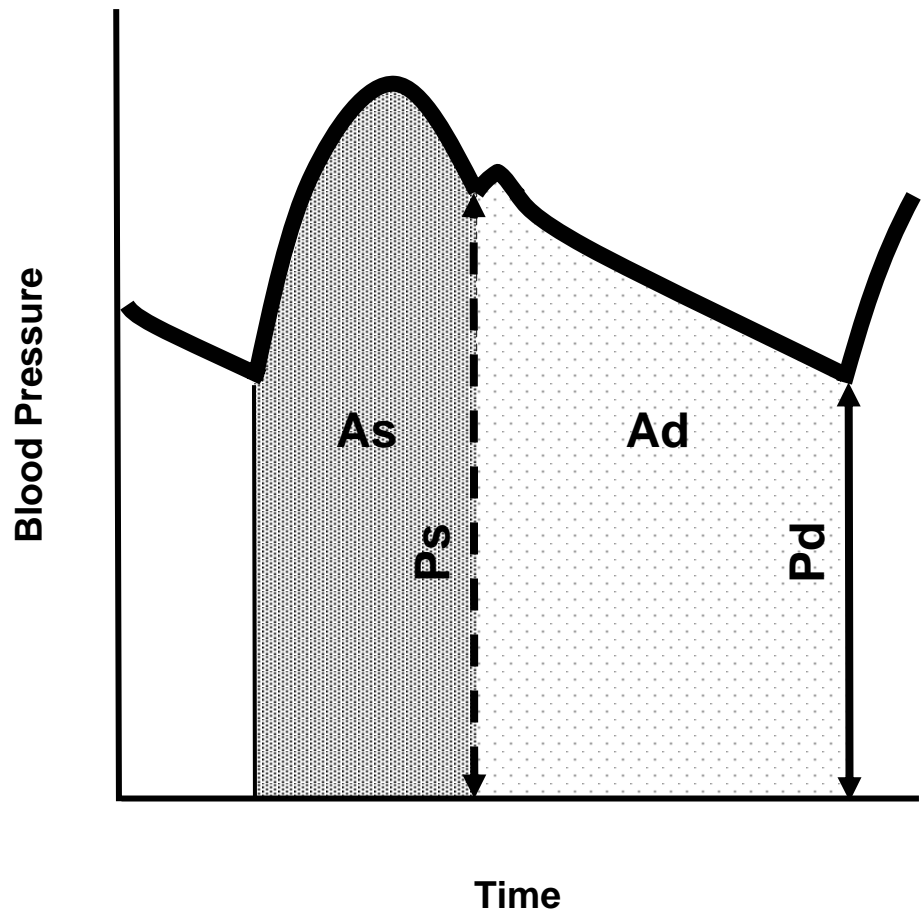


Fig. 1-1 Windkessel function of the aorta (Beltz 1995).

Upper panel: During systole the ventricle (left) ejects the stroke volume (100 %) into the aorta; around 50 % of the volume is directly forwarded into the peripheral circulation (right), and the other 50 % leads to an extension of the aortic wall and is stored (storage volume). The energy needed to extend the wall is then available in diastole.

Lower panel: During diastole the aorta passively contracts due to its elastic properties, and, utilizing the energy stored during systole, the other 50 % of the stroke volume is forwarded into the peripheral circulation (including the coronary system). The rhythmic pulsations of intravascular volume, induced by the rhythmic actions of the heart, are buffered and converted into an almost continuous peripheral blood flow by these elastic properties of the aorta.



$$\text{SAC} = \text{SV} / \text{K} / (\text{Ps} - \text{Pd})$$

$$\text{K} = (\text{As} + \text{Ad}) / \text{Ad}$$

Ps: Blood pressure at end systole

Pd: Blood pressure at end diastole

As: Total systolic area

Ad: Total diastolic area

Fig. 3-1 Calculation method of SAC.

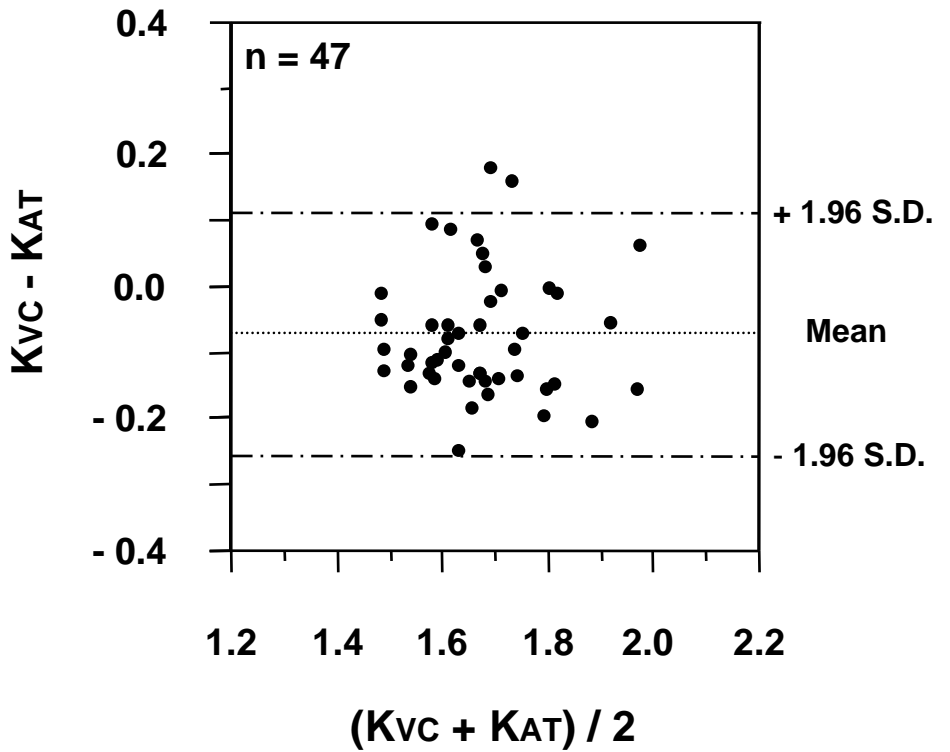
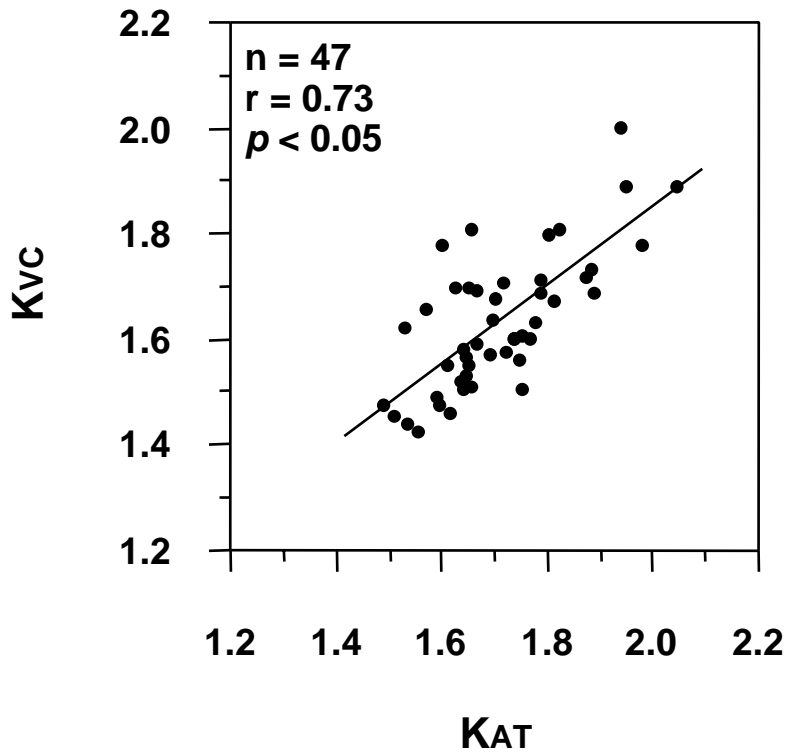


Fig. 4-1-1 Relationships between KVC and KAT at rest in the elderly subjects.

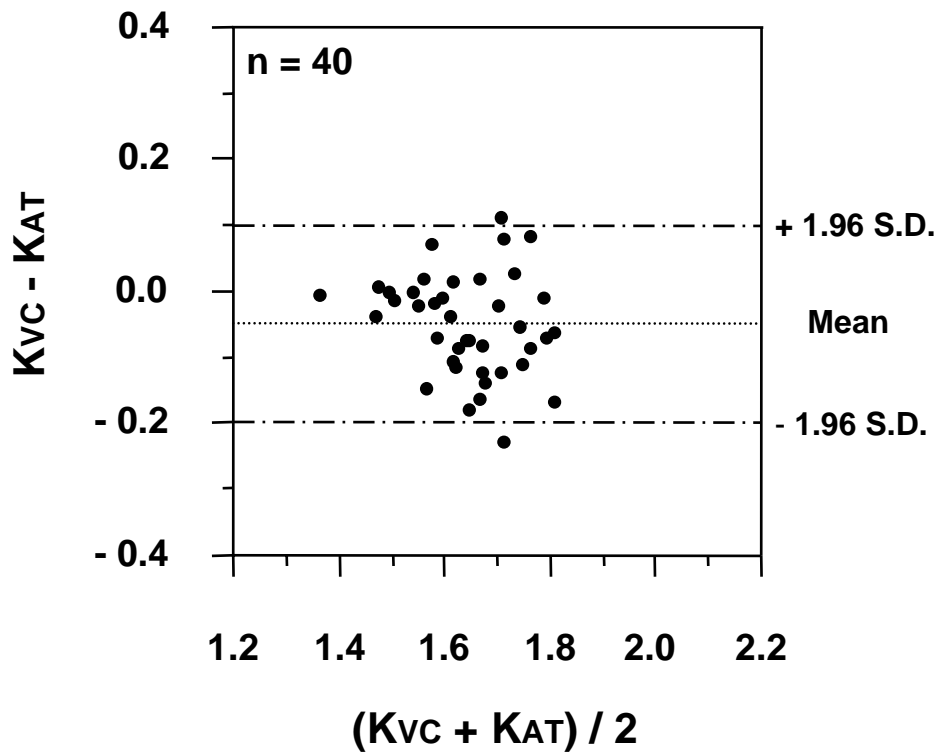
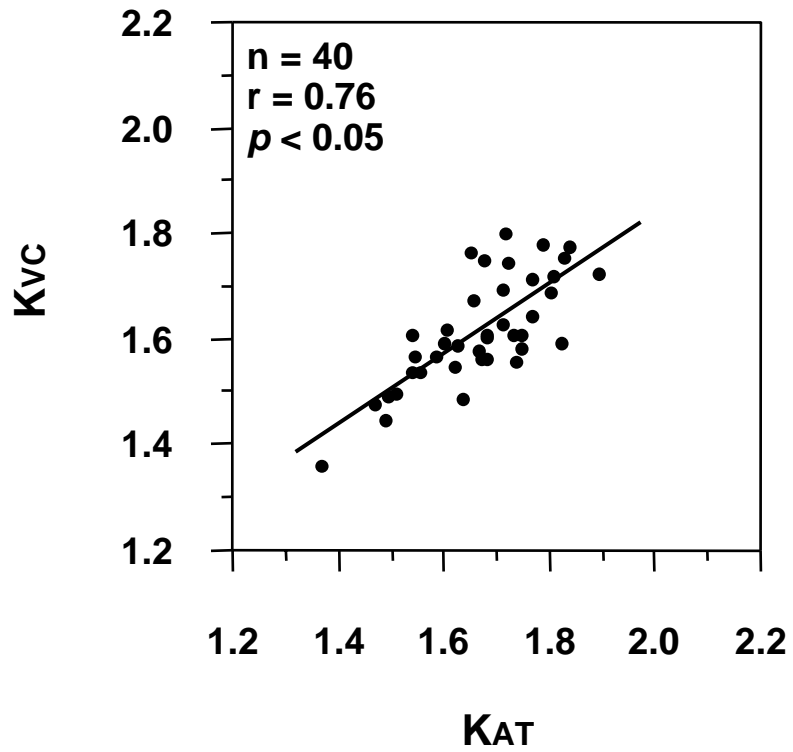
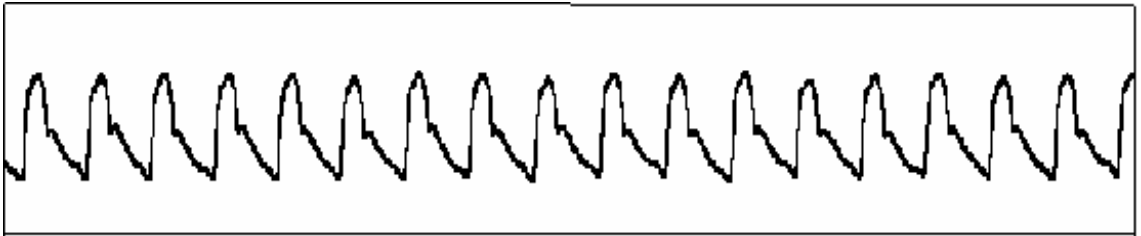


Fig. 4-1-2 Relationships between KVC and KAT at rest in the young subjects.

Favorable Record

Age, 65 years; Height, 163 cm; Weight, 64.5kg; HR, 70 bpm



Poor Record

Age, 64 years; Height, 150 cm; Weight, 46.8 kg; HR, 88 bpm

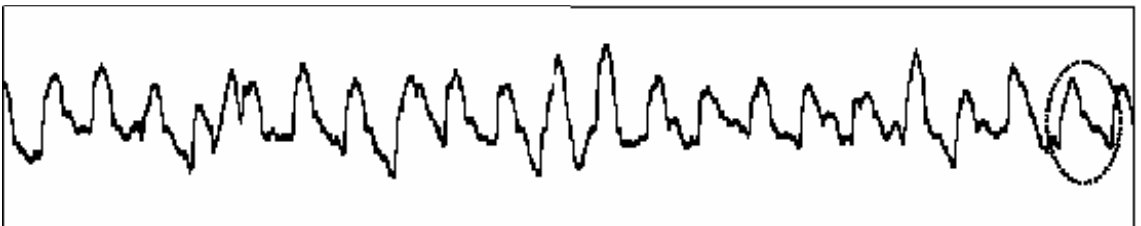


Fig. 4-2-1 Typical example of carotid arterial blood pressure waveform.

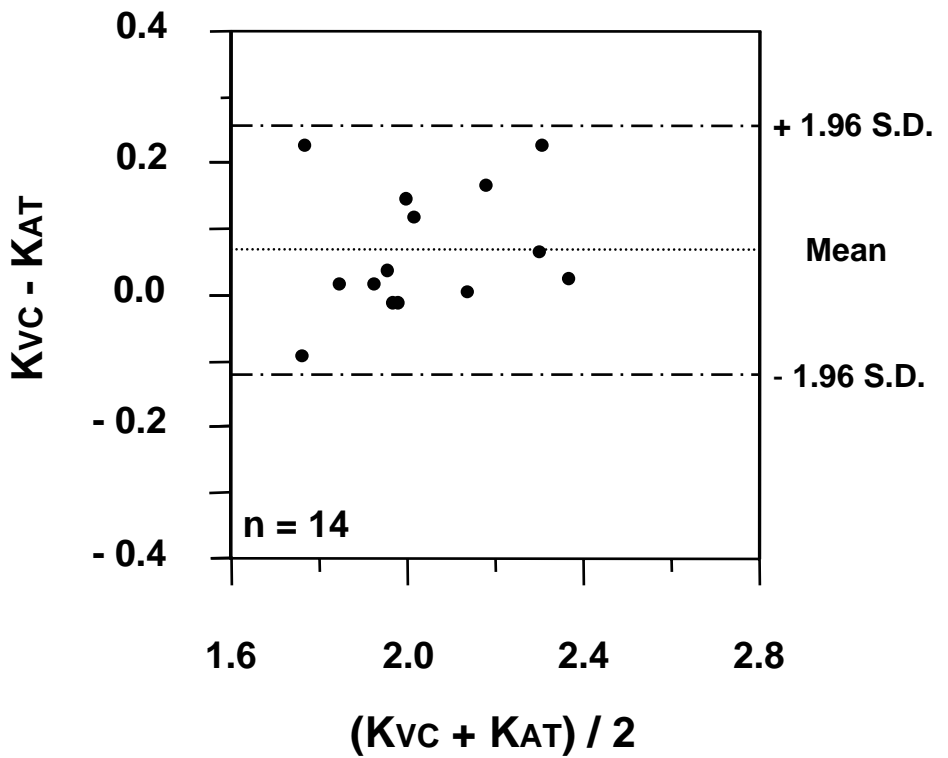
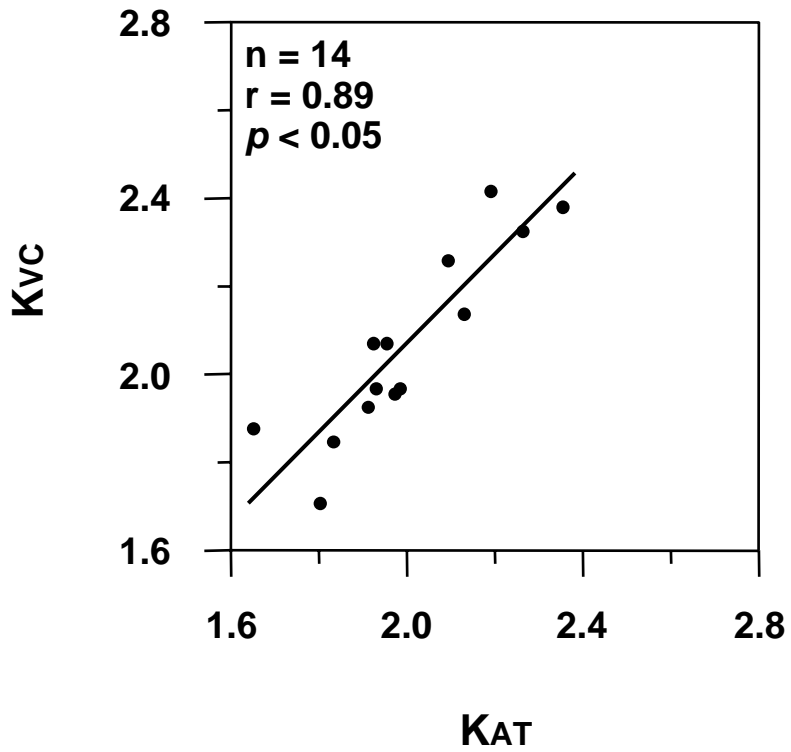


Fig. 4-2-2 Relationships between KVC and KAT during exercise in the elderly subjects.

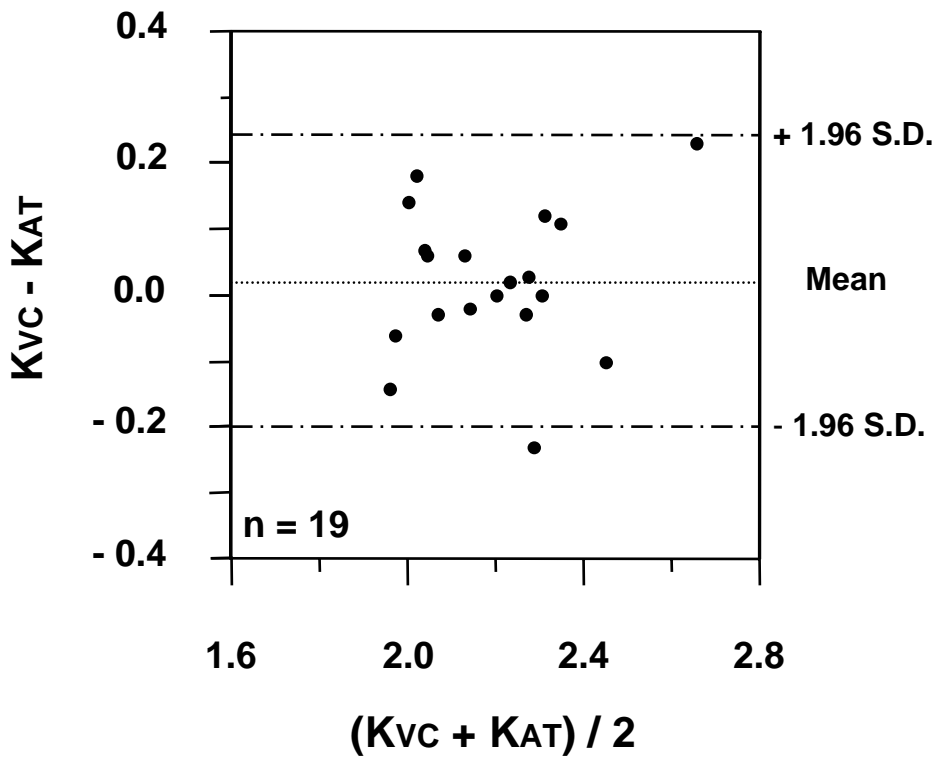
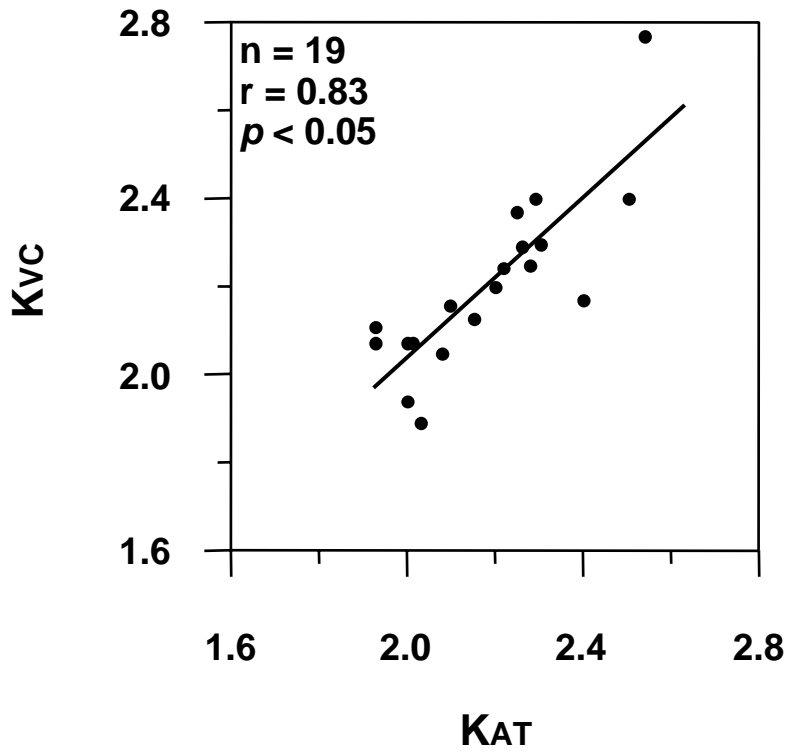


Fig. 4-2-3 Relationships between KVC and KAT during exercise in the young subjects.

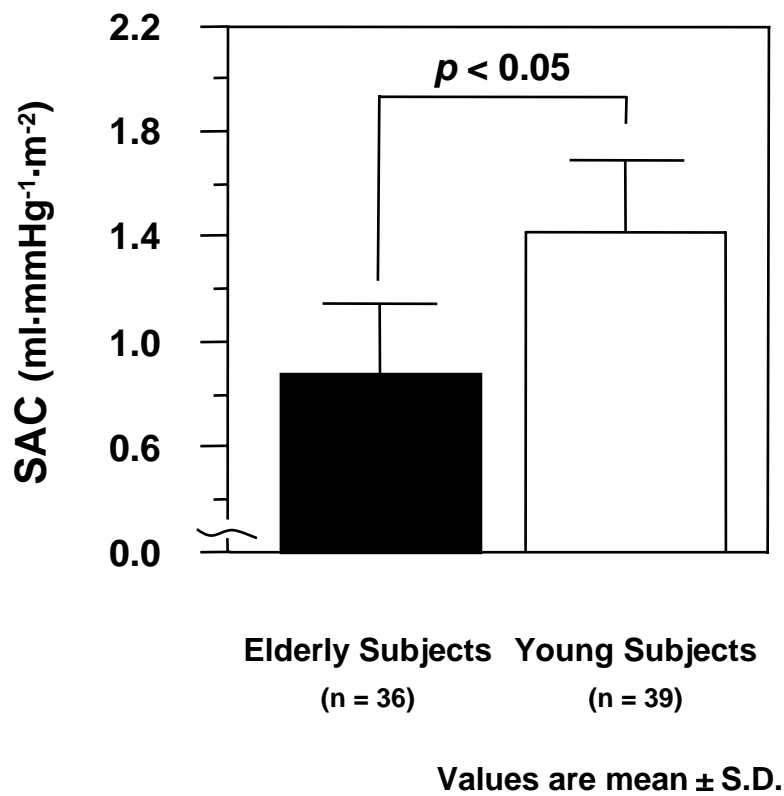
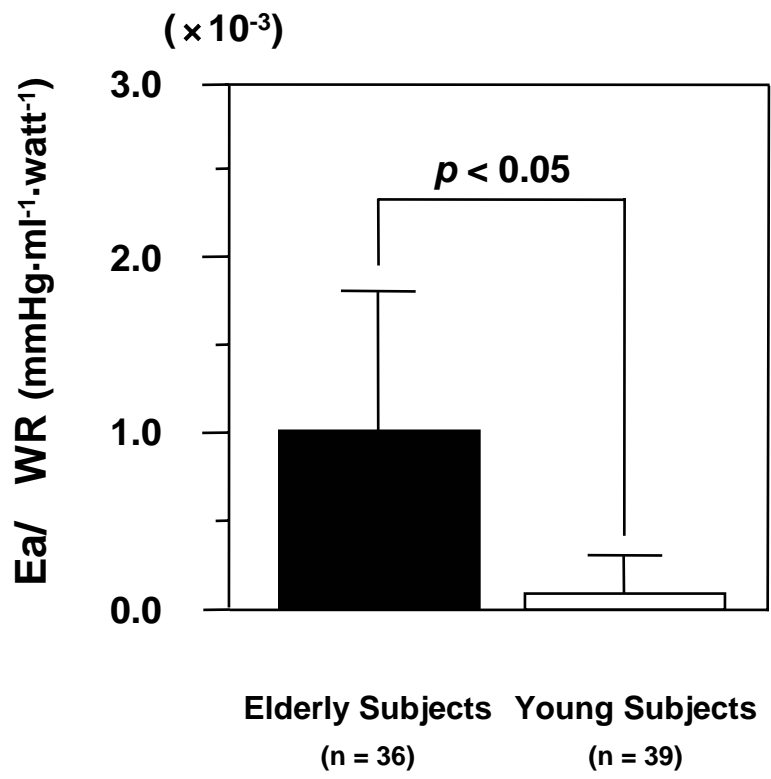


Fig. 5-1-1 Comparison of SAC between the elderly subjects and the young subjects.



Values are mean \pm S.D.

Fig. 5-1-2 Comparison of Ea/WR between the elderly subjects and the young subjects.

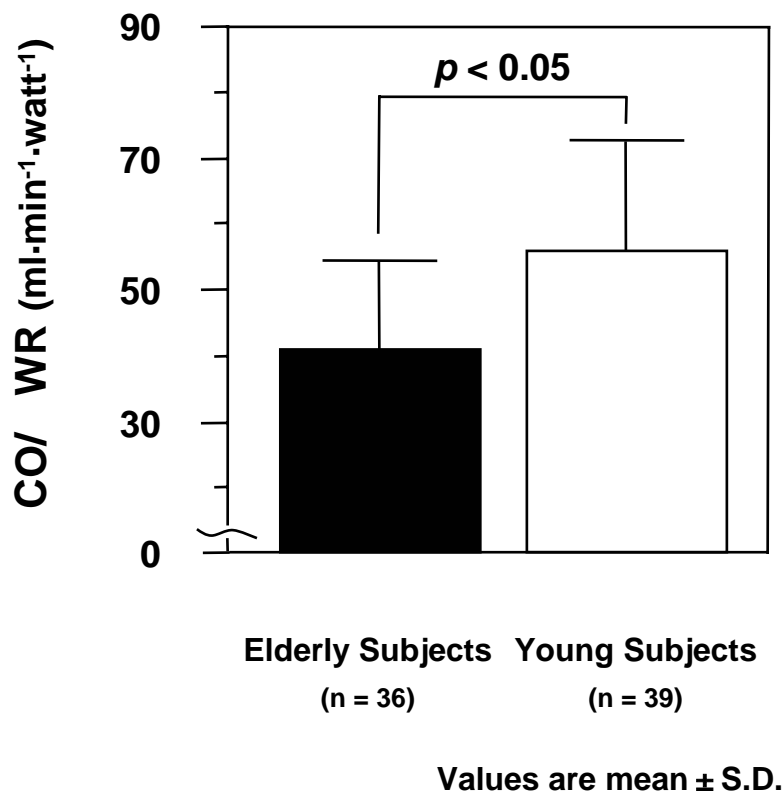
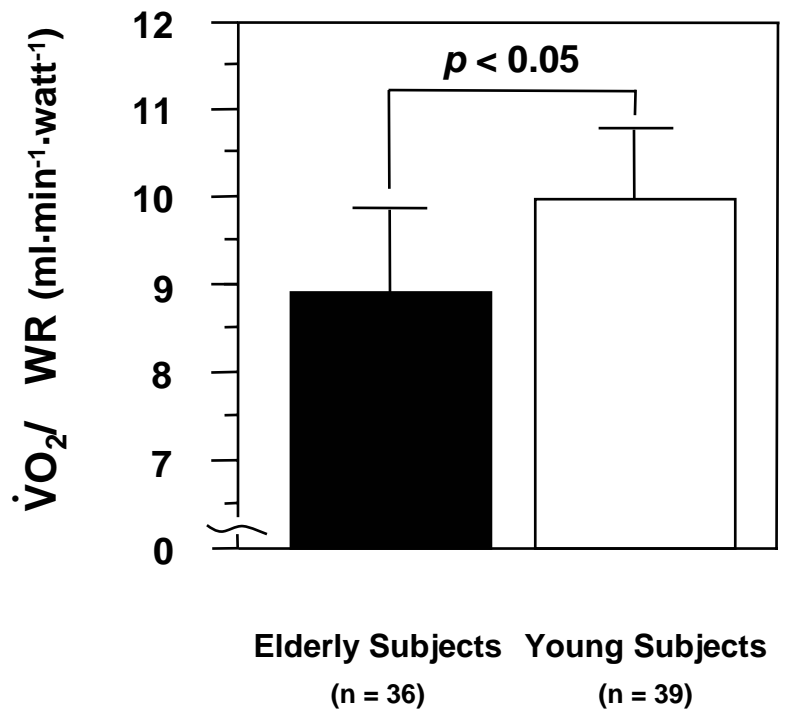
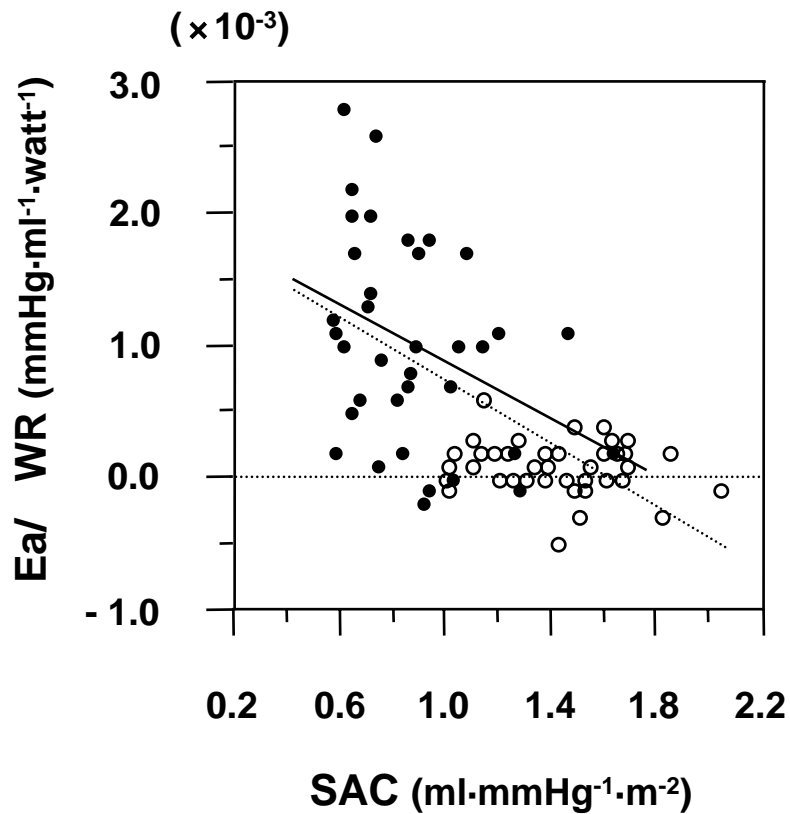


Fig. 5-1-3 Comparison of CO/ WR between the elderly subjects and the young subjects.



Values are mean \pm S.D.

Fig. 5-1-4 Comparison of $\dot{V}O_2/WR$ between the elderly subjects and the young subjects.



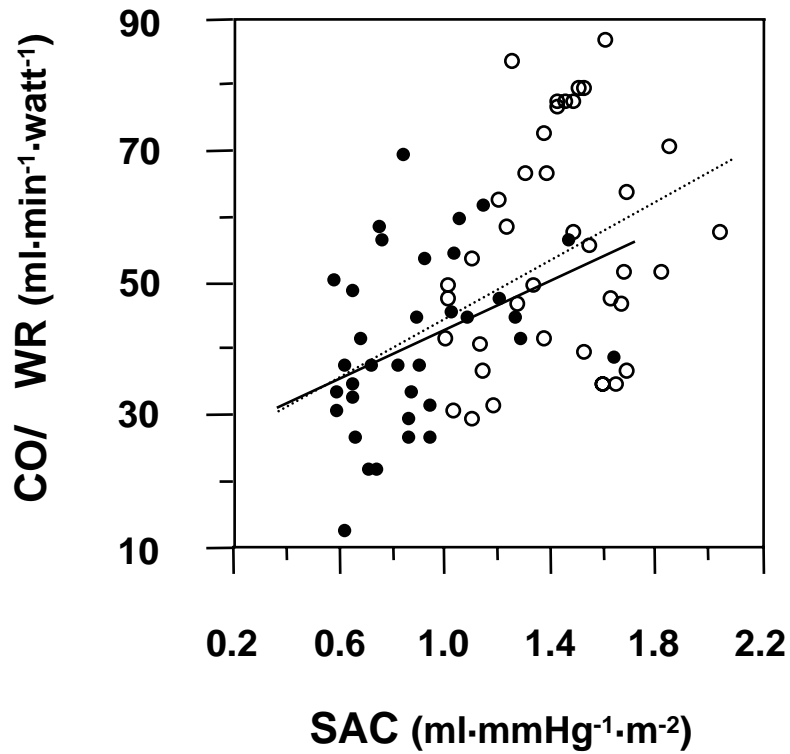
All Subjects
 n = 75
 r = - 0.61
 p < 0.05

• **Elderly Subjects**
 n = 36
 r = - 0.36
 p < 0.05

○ **Young Subjects**
 n = 39
 r = - 0.15
 n.s.

Fig. 5-1-5 Relationships between SAC and Ea/ WR.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.



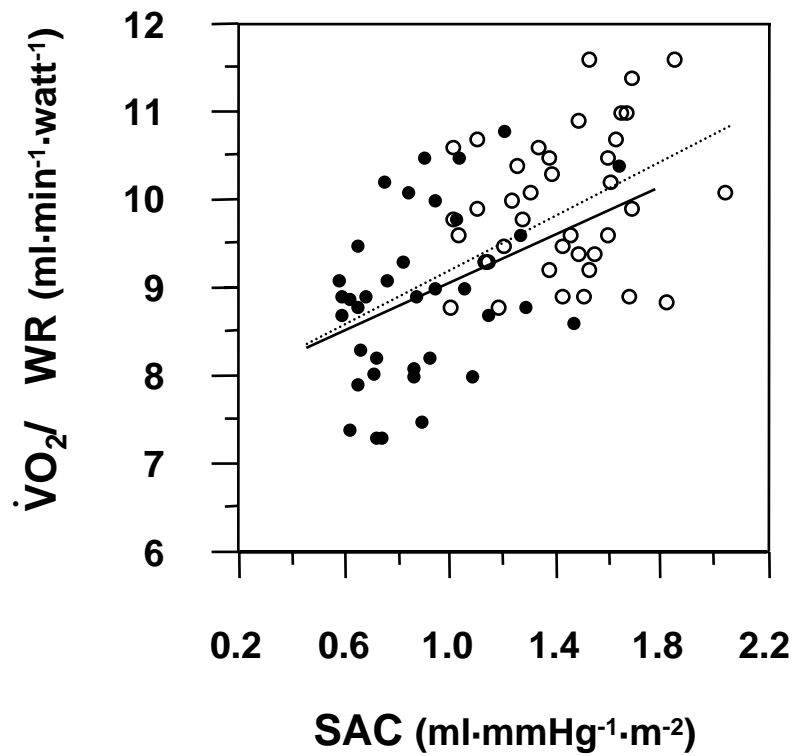
All Subjects
 n = 75
 r = 0.49
 p < 0.05

• **Elderly Subjects**
 n = 36
 r = 0.36
 p < 0.05

○ **Young Subjects**
 n = 39
 r = 0.22
 n.s.

Fig. 5-1-6 Relationships between SAC and CO/WR.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.



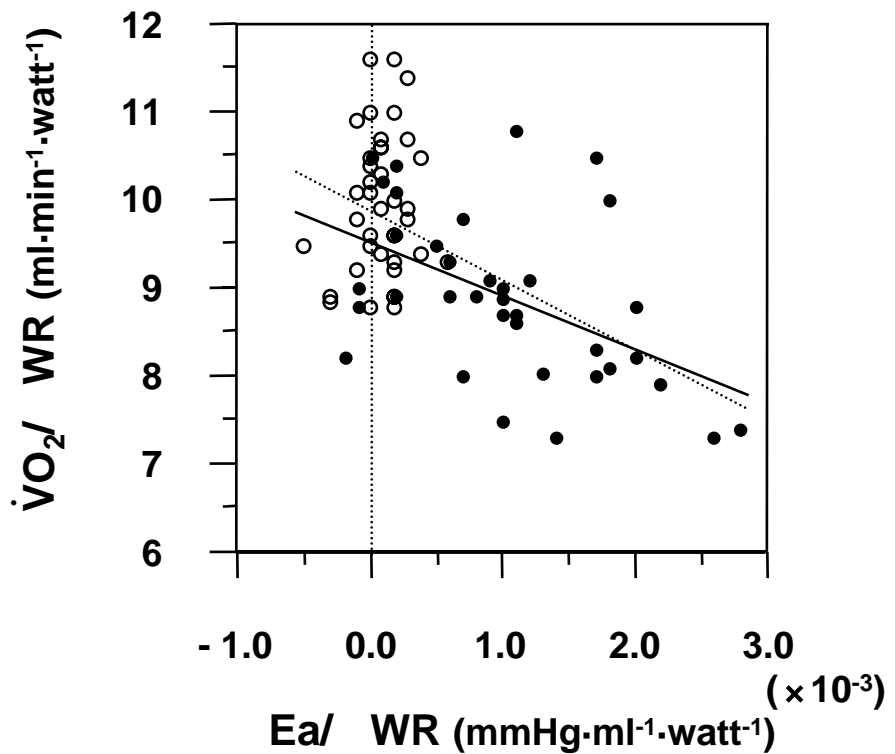
All Subjects
 n = 75
 r = 0.56
 p < 0.05

• **Elderly Subjects**
 n = 36
 r = 0.37
 p < 0.05

○ **Young Subjects**
 n = 39
 r = 0.25
 n.s.

Fig. 5-1-7 Relationships between SAC and $\dot{V}O_2/WR$.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.



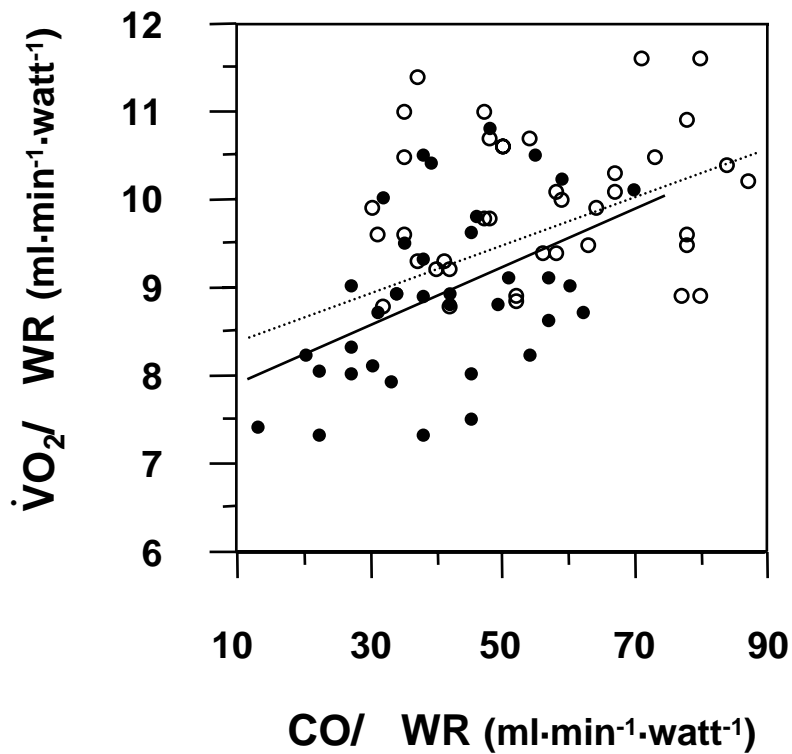
All Subjects
 n = 75
 r = - 0.56
 p < 0.05

• **Elderly Subjects**
 n = 36
 r = - 0.49
 p < 0.05

○ **Young Subjects**
 n = 39
 r = 0.11
 n.s.

Fig. 5-1-8 Relationships between Ea/ WR and $\dot{V}O_2/ WR$.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.



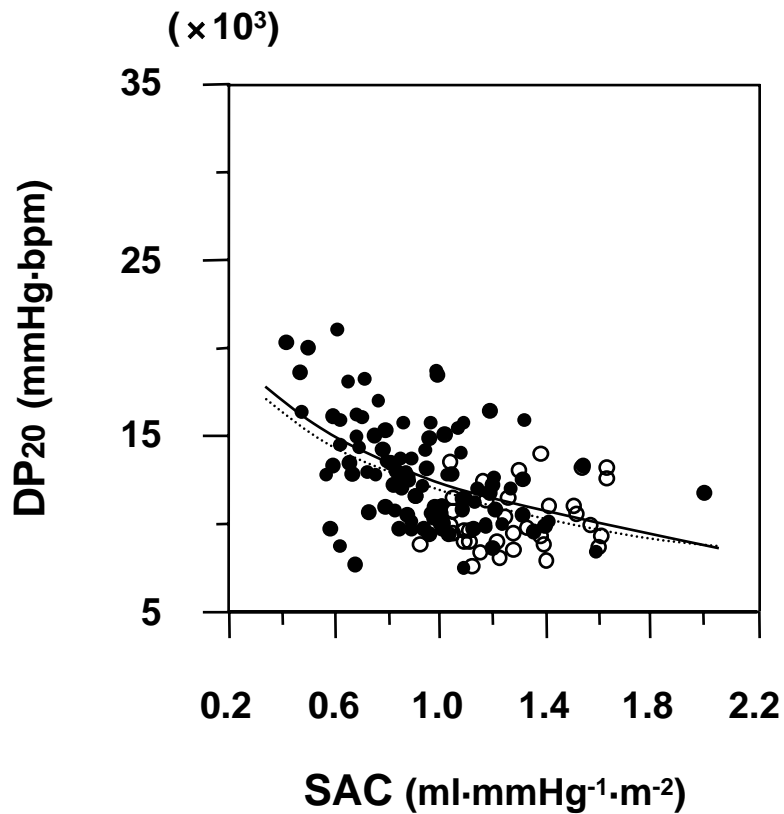
All Subjects
 n = 75
 r = 0.45
 p < 0.05

• **Elderly Subjects**
 n = 36
 r = 0.46
 p < 0.05

○ **Young Subjects**
 n = 39
 r = 0.16
 n.s.

Fig. 5-1-9 Relationships between CO/ WR and $\dot{V}O_2/ WR$.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.



All Subjects

n = 136
r = - 0.51
p < 0.05

• **Elderly Subjects**

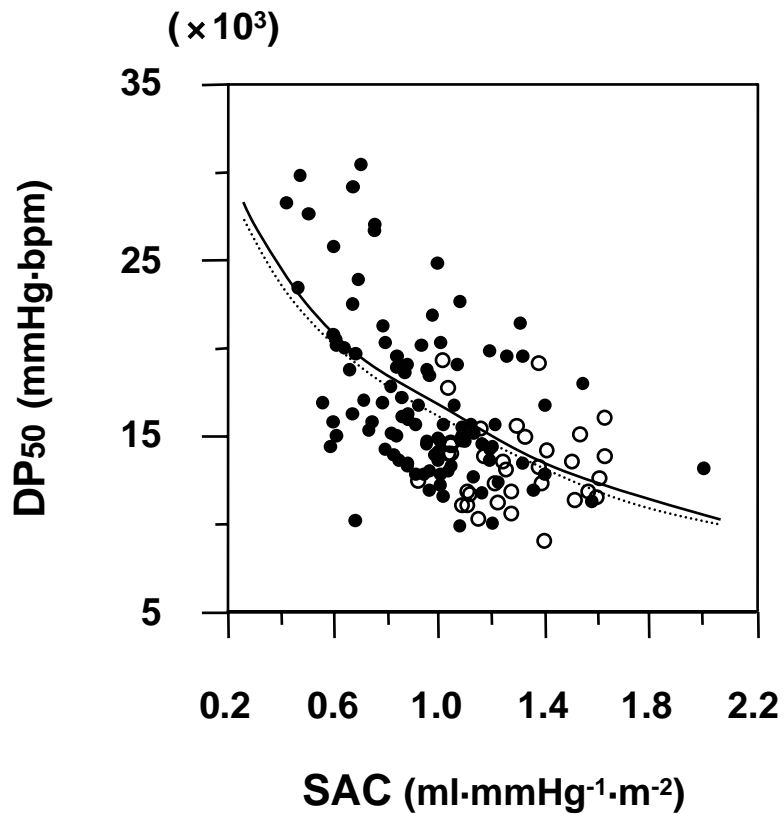
n = 100
r = - 0.49
p < 0.05

○ **Young Subjects**

n = 36
r = - 0.11
n.s.

Fig. 5-2-1 Relationships between SAC and DP20.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
The solid line is the regression line of the elderly subjects.



All Subjects

n = 136
 r = - 0.57
 p < 0.05

• Elderly Subjects

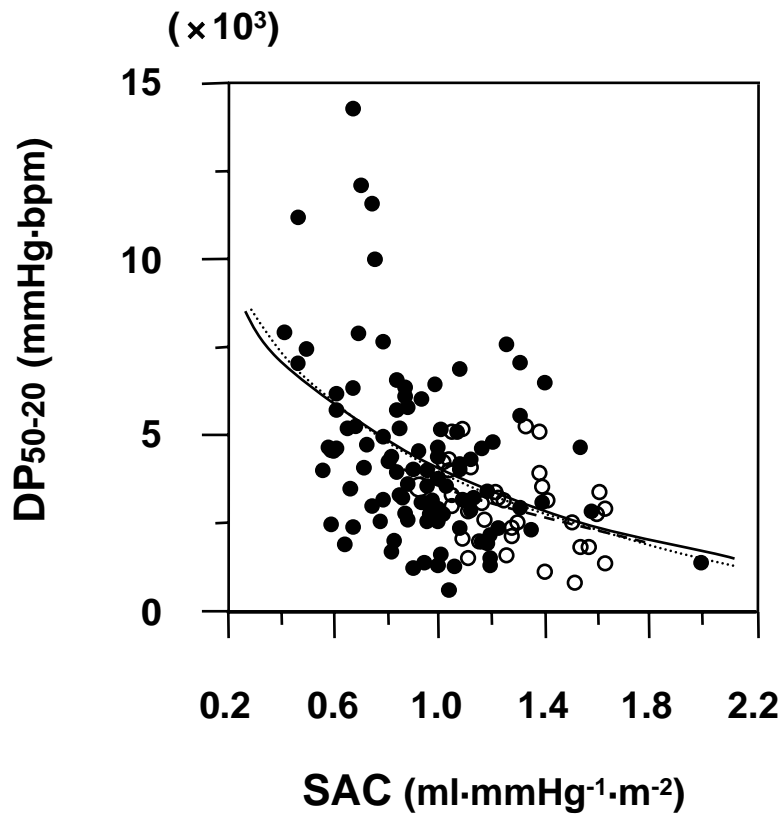
n = 100
 r = - 0.52
 p < 0.05

○ Young Subjects

n = 36
 r = - 0.10
 n.s.

Fig. 5-2-2 Relationships between SAC and DP₅₀.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.



All Subjects

n = 136
 r = - 0.47
 p < 0.05

• Elderly Subjects

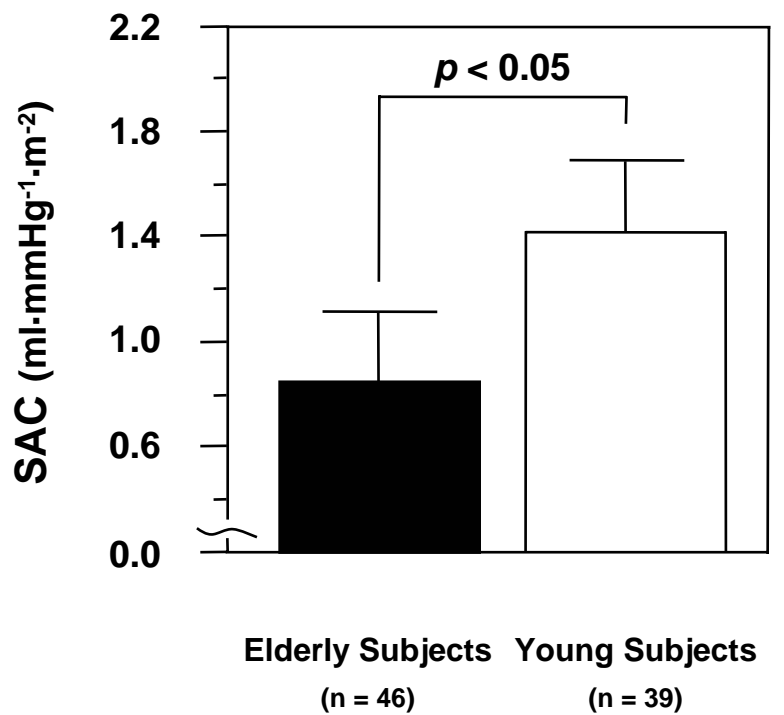
n = 100
 r = - 0.40
 p < 0.05

○ Young Subjects

n = 36
 r = - 0.38
 p < 0.05

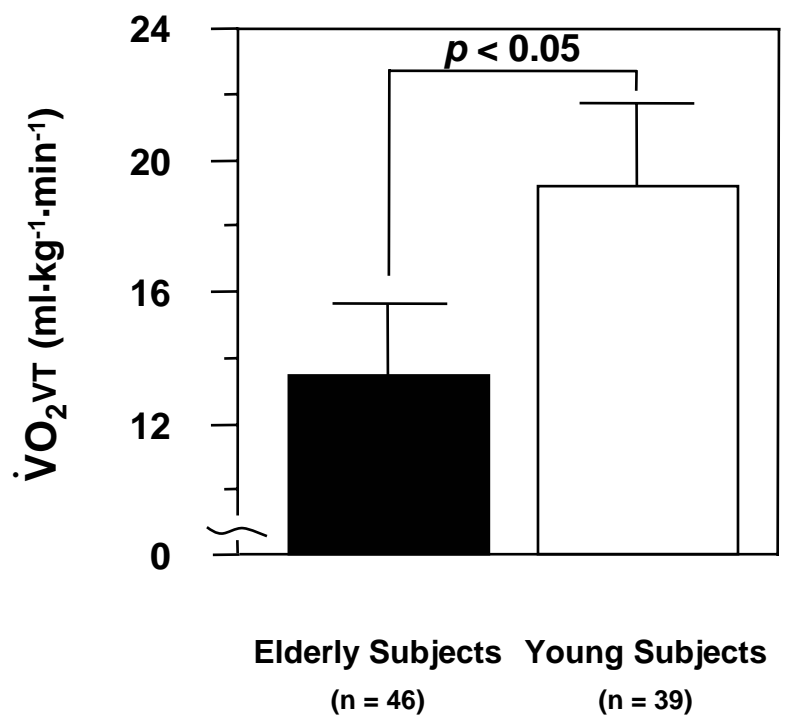
Fig. 5-2-3 Relationships between SAC and DP₅₀₋₂₀.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.
 The short dashed line is the regression line of the young subjects.



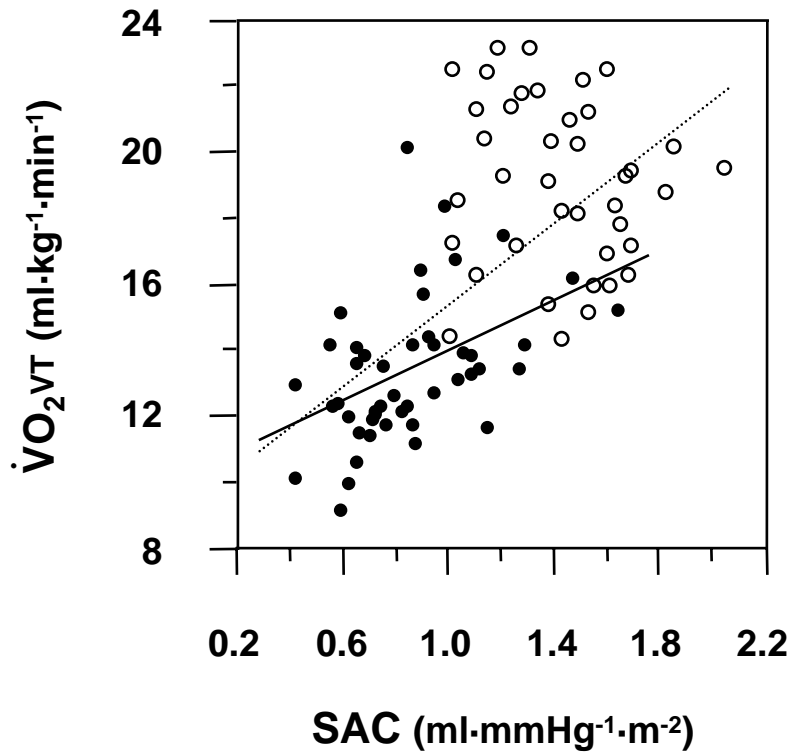
Values are mean ± S.D.

Fig. 6-1 Comparison of SAC between the elderly subjects and the young subjects.



Values are mean \pm S.D.

Fig. 6-2 Comparison of $\dot{V}O_{2VT}$ between the elderly subjects and the young subjects.



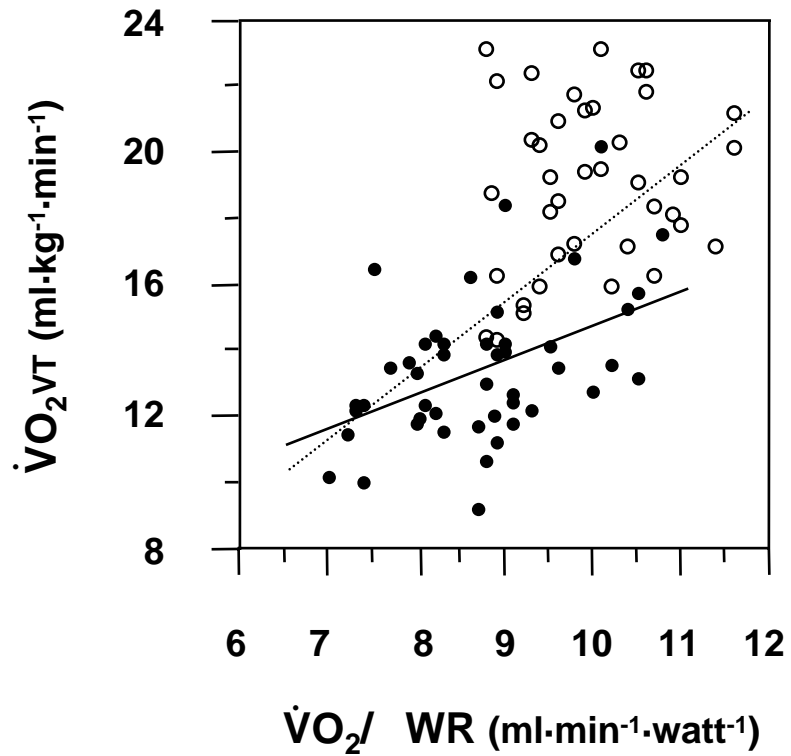
All Subjects
 n = 85
 r = 0.65
 p < 0.05

• **Elderly Subjects**
 n = 46
 r = 0.46
 p < 0.05

○ **Young Subjects**
 n = 39
 r = - 0.13
 n.s.

Fig. 6-3 Relationships between SAC and $\dot{V}O_{2VT}$.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.



All Subjects
 n = 85
 r = 0.61
 p < 0.05

• **Elderly Subjects**
 n = 46
 r = 0.46
 p < 0.05

○ **Young Subjects**
 n = 39
 r = 0.17
 n.s.

Fig. 6-4 Relationships between $\dot{V}O_2/WR$ and $\dot{V}O_{2VT}$.

The dotted line is the regression line of the all subjects.
 The solid line is the regression line of the elderly subjects.

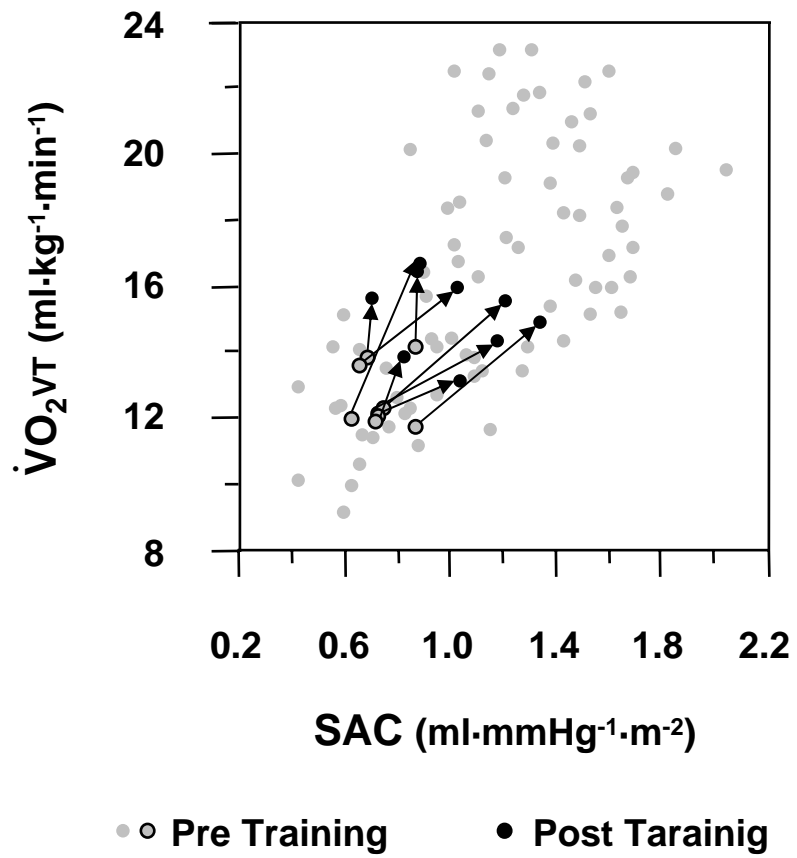


Fig. 7-1 Effects of exercise training on SAC and $\dot{V}O_{2VT}$.