

# 超音波法を用いたヒト静脈血管コンプライアンスの 定量的評価手法の開発とその応用

県立広島女子大学 遠藤 雅子

(共同研究者) 同 三浦 朗

## Measurement of Venous Compliance in Human Limb with an Ultrasonography: its Technical Development and Application

by

Masako Endo, Akira Miura

*Department of Exercise Science and Physiology,*

*School of Health Sciences,*

*Hiroshima Prefectural Women's University*

### ABSTRACT

A new technique for measuring the compliance in conduit venous vessels in human limb was proposed in this study. In our proposed method, the compliance in Popliteal vein was measured from the relationship of the venous pressure ( $P_v$ ) and its cross sectional area (CSA) using by a B-mode ultrasonography, in order to conquer a problem in the previously proposed estimation method with a venous congested plethysmography (VCPG) in the calf. The main purpose in this study was, therefore, to examine the relationship between both venous compliances derived from the proposed and previous methods. In 12 healthy adult subjects with a supine position, the venous compliances were measured simultaneously via both methods during decreasing venous collecting cuff (around right thigh) pressure at 1 mmHg/s to 0 mmHg (i.e., over 1 min) after 4 min of the inflation at 60 mmHg as an estimate of  $P_v$ . The compliance values ( $C_{vc}$  and  $C_{vv}$ ) were conventionally derived from  $P_v$  vs. CSA and volume ( $V$ ) over the 20-40 mmHg pressure range with proposed and previous methods, respectively. The  $V$  in calf by VCPG

showed the gradually increment in all subjects even at the end of 4-min cuff inflation at 60 mmHg, whereas the diameter in Popliteal vein reached the steady state with a rapid expansion. This confirmed the problem which presumably existed in the previous method, that is, the V change with VCPG includes the water amount in intercellular space by capillary filtration in addition to the venous space. The Cvc showed a positive correlation to Cvv significantly ( $p < 0.05$ ). The result indicates that the compliance in conduit vein in human limb can be determined from CSA-Pv relationship noninvasively with our proposed technique under a more plausible physiological assumption.

## 要 旨

本研究では、伝導性静脈血管のコンプライアンスを測定する新たな方法を提案した。この方法は、静脈閉塞プレチスモグラフィ法（VCPG法）を用いた従来のコンプライアンス（Cvv）推定法に含まれる問題点を解決するために、超音波Bモード法で、膝窩静脈を直接描画し、血管横断面積（CSA）と静脈内圧（Pv）の関係から伝導性静脈血管のコンプライアンス（Cvc）を測定するものである。従って、本研究の主たる目的は、我々が開発した手法によって測定されたCvcと従来法によって推定されたCvvを比較・検討することであった。被検者は健康な成人男女12名であった。仰臥位の被検者は、右脚大腿部にカフを装着し、カフ圧60mmHgで4分間静脈閉塞を行った後、毎秒1mmHgずつの割合で0mmHgまで減圧した。この減圧期間中、超音波Bモード法とVCPG法による静脈コンプライアンス測定が行われた。両方法によるコンプライアンスは、Pv（カフ圧）が40から20mmHgへと変化する際のCSA（Cvc）および下腿容積（Cvv）の変化から、それぞれ求められた。カフ圧60mmHgでの4分間の静脈閉塞時、膝窩静脈血管は速やかに膨張し、その後4分間はほぼ定常状態を示したのに対して、VCPG法によって記録された下腿容積は定常を示すことなく増大し続けた。このことは、従来法に存在する問

題点、すなわち、VCPG法による下腿容積の変化によるCvv推定には、静脈スペースに加えて細胞間隙への水分過剰が含まれるという問題点を確認することになった。CvcとCvvの関連性を検討したところ、有意な正の相関関係（ $p < 0.05$ ）が認められた。本研究の結果は、伝導性静脈のコンプライアンスは、我々の提案した方法によるCSA-Pv関係から、より生理的に妥当な仮定のもとで評価が可能であることを示唆する。

## はじめに

大動脈系の血管伸展性評価に関しては、脈波速度（PWV）といった非侵襲的で簡便な方法が確立され、それをを用いた調査・研究はここ数年、急激に増大している（例えばAsmarらの総説<sup>1)</sup>を参照）。臨床領域でも近年では、PWVのみならず、超音波画像で評価された頸動脈血管伸展性と臨床所見との関連性（例えばSealsやSaferらの総説<sup>12, 13)</sup>を参照）などから、動脈硬化度の非侵襲的な推定の重要性は広く認識され始めている。一方、静脈サイドにおける血管伸展性評価の必要性もまた、認識される<sup>11)</sup>が、非侵襲的な方法確立への端緒は、つい最近までなされてこなかった。

下肢静脈系の血管伸展性（コンプライアンス）は、その特性が容量血管であるという点から、特に二足歩行を行うヒトにおいては、運動時や起立時の静脈還流を維持する上で大変重要な要因とな

る。また、特に女性でよく取り上げられる、日常的な健康問題のひとつとして、長時間の立位姿勢に伴う下肢の“むくみ”（浮腫）もまた、下肢静脈系の血管コンプライアンスが関与している可能性がある。これらの点からも、ヒト下肢静脈血管コンプライアンスの定量的評価手法を開発する意義が認識される。

現時点で提案されている、下腿静脈コンプライアンス（以下、Cvと略す）を非侵襲的に測定する手法は、Halliwillら<sup>5)</sup>による、静脈閉塞プレティスモグラフィ（Venous Congested Plethysmography；VCPG）法を改良した推定方法のみである。しかし、その推定手法には、問題点が指摘される（具体的な彼らの手法と我々が考える問題点の詳細は、研究方法1.3で説明）。そこで本研究では、VCPG法ではなく、超音波画像撮影法を用いた手法の開発を試みた。我々が開発した手法によって評価されたCvと、VCPG法による従来の手法で推定されたCvを比較検討することを、本研究の主な目的とした。あわせて、基礎的な検討として、大動脈血管系のコンプライアンスの代表的な指標であるPWVと本研究で開発した手法によって測定されたCvの関連性を検討した。さらに実学的な検討の例のひとつとして、下肢への“むくみ”（浮腫）を抑制する目的で市販されている弾性ストッキング装着の効果を、VCPG法によって推定されたCvと本研究で開発した手法を適用して求めたCvから検討した。

## 1. 研究方法

### 1.1 被検者

被検者は健康な男女12名であった。その年齢、身長、体重の範囲は、それぞれ20-48歳、152-177cm、41-74kgであった。特に高い運動習慣・トレーニング歴といった身体活動性を有した被検者はいなかった。

被検者は、実験の目的、内容、リスクについて

詳細な説明を受けた後、本実験の被検者として参加することを承諾した。

### 1.2 Cv測定のための設定条件

被検者は、右脚大腿部に静脈閉塞用円錐形カフ（幅；18 cm, Hokanson社製）を装着し、右下腿中央部（最大周径部）には、各被検者の周径位に合わせた水銀封入ラバーストレインゲージ（長さ；28-36 cm, Hokanson社製）を装着し、記録計（EC-6；Hokanson社製）に接続した。従来の標準的なVCPG法<sup>6)</sup>に準拠して、被検者の姿勢は仰臥位で、測定対象肢である右下肢の踵部が水平面から13cm高くなるように保持した。その状態のまま、40分間の安静の後、カフ圧0mmHgで2分間安静を保ち（安静値の記録）、その後カフ圧を60mmHgにすばやく上昇、保持し、4分間の静脈閉塞を施した後、毎秒1mmHgずつの率で、0mmHgまで連続的かつ滑らかに減圧した。これら一連のカフ圧操作は、カフと圧縮空気ポンベの間に設置した電磁弁をパソコンからD/A変換した電圧信号で制御することによって実現された。設定カフ圧は、同時にその系の間に設置した圧力計測器で確認された。4分間の静脈閉塞を施した後、この最後1分間のカフ減圧期間が後述のCv測定のための対象期間となった。なお、すべての測定は、室温25℃前後に調節された静かな薄暗い部屋でおこなわれた。

### 1.3 HalliwillらによるCv (Cw) 評価法

我々が本研究で開発・提案する手法の意義を説明するにあたって、まずHalliwillら<sup>5)</sup>の手法を説明する。研究方法1.2に示したような実験設定条件下で、静脈閉塞用のカフ圧を60mmHgに加圧し4分間維持すると、カテーテルを挿入して直接的に測定した、カフ遠位側での下腿膝窩静脈血圧 (Pv) はカフ圧と等値になり、その後、徐々

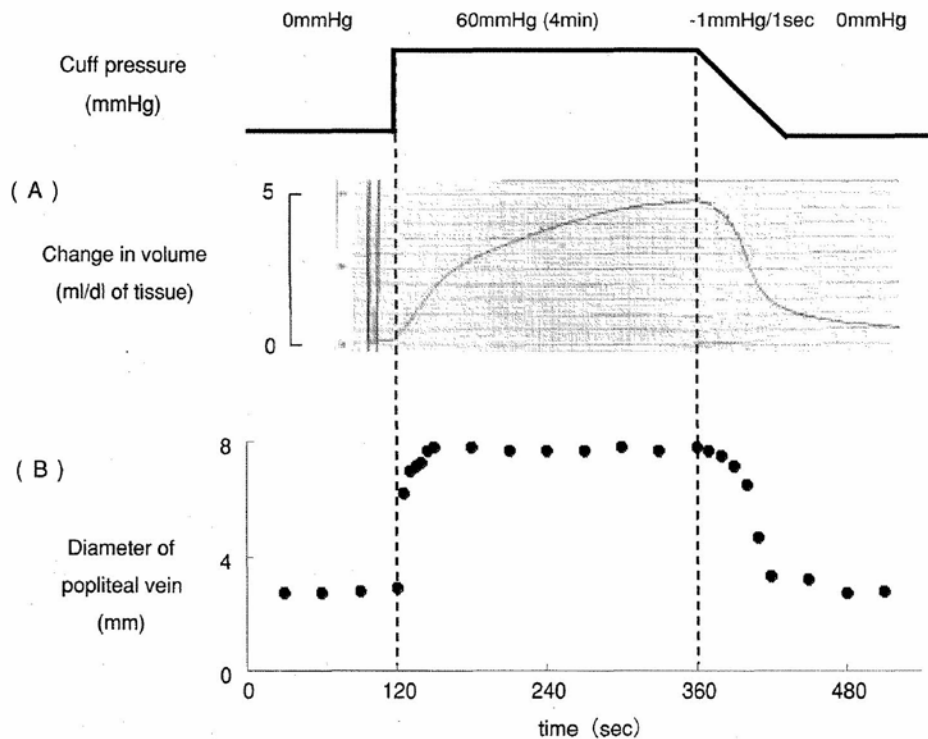


図1 静脈コンプライアンス測定の実例の一例  
 (A) VCPG法によるHalliwillらの従来の方法, (B) 膝窩静脈血管径に基づく本研究で開発した方法

に減圧すると、10～60mmHgの範囲では、カフ圧とPvは等しいまま推移することが、すでにいくつかの先行研究<sup>3,5)</sup>で確認されている。従って、-1mmHg/sでカフ減圧操作中、下腿容量をVCPG法で連続的に測定し、両者(容積-圧)の関係を求める(図1(A)に測定の実例を示す)。単位圧力変化あたりの容積変化率がCvであるが、Cvには圧依存性があるので、簡便な指標として、Halliwillら<sup>5)</sup>は、40と20mmHgの両圧力時の容積からCv(図2における、20および40mmHgの両白丸ポイント間の傾きに相当)を求め、比較検討することを提唱しており、本研究でもそれを採用した(以降、これをC<sub>vv</sub>[単位: ml/dl/mmHg]と呼ぶ)。

Halliwillら<sup>5)</sup>は、このような一連の操作で測定される下腿容積の増大は、静脈容量血管系全体に貯留している血液による静脈血管膨満とみなしている。しかし、VCPG法による体肢容積変化には、その方法の本来の目的であるカフ加圧直後数秒間は動脈血液流入のみが起こるということを想定し

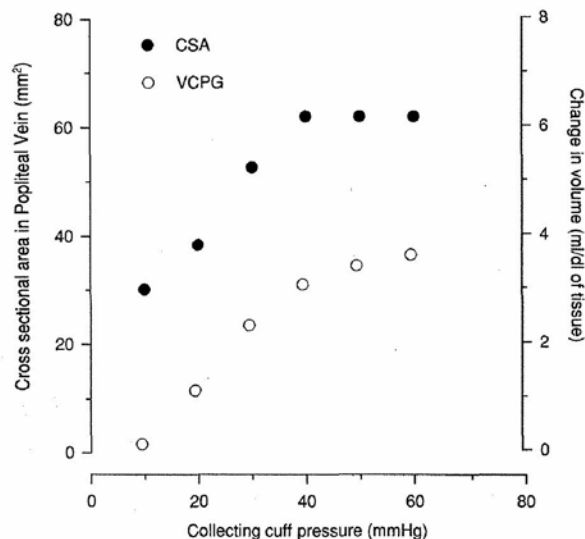


図2 静脈コンプライアンス測定時(-1mmHg/1sでのカフ圧減圧時)の膝窩静脈断面積(黒丸)と下腿容積(白丸)の変化の一例

て血流量測定を行う場合<sup>7)</sup>とは異なり、そのような短時間(通常、3-10秒程度)をこえたカフ操作による静脈閉塞を継続すると、静脈容量血管膨満による血管内への血液貯留以外に、細胞間隙への水分ろ過(いわゆる細胞外液増大:浮腫)が、閉塞後わずかな2-3分から起こることはすでに古くから知られている<sup>2,3,4)</sup>。従って、彼らの手

法<sup>5)</sup>で使用されるVCPG法による下腿部容積変化には、仮定される静脈血管内の血液容積変化だけを反映していないという可能性が極めて高く、手法の仮定上に問題点が存在することになる。

#### 1. 4 本研究で開発・提案するCv (Cvc) 評価法

上述したような、既存のVCPG法を用いたCvv推定法<sup>5)</sup>に存在する問題点を解決するために、本研究では、超音波エコー装置を用いて、直接、膝裏から描画できる膝窩静脈の血管径を、彼らと同様なカフ操作時に測定し、カフ圧減圧時の血管断面積-圧関係からCvを計測する方法を開発・提案することとした。以下に、その方法の具体的な方法を説明する。

上述のようなCvv推定と同様なプロトコール期間中を通して、超音波診断装置 (EUB-565A, 6.0 MHz リニアプローブ使用: 日立メディコ製) により、Bモード法で右膝窩静脈血管縦断面を描画した。描画された画像は、接続したVHSビデオレコーダに、測定装置の時刻タイム情報と共に映像記録され、その後の画像解析に供された。

ビデオ画像からの膝窩静脈血管径の計測には、パソコンへの画像取り込みソフト (Video-Shop, Ver3.0J) ならびに画像解析ソフト (NIH-Image, Ver1.60) を用いた。計測のための画像は、安静時ならびに4分間の60mmHgでのカフ加圧中には30秒毎に、Cv測定のための-1mmHg/s減圧中 (1分間) には4秒毎に、それぞれ画像を静止してパソコン内へ取り込んだ。静止画像からの血管径測定は、NIH-Imageの距離計測機能を用いて行った (図1 (B) にその結果の一例を示す)。なお、画像解像度から計測可能な最小距離は、0.125mmであった。膝窩静脈のCv算出のためには、血管形状を円筒形と仮定し、その横断面積を用いた。VCPG法を用いて推定されるCvvと同様に、-1mmHg/sで減圧中の40ならびに20mmHgのカフ

圧時点での血管横断面積からCv (図2における20および40mmHgの両黒丸ポイント間の傾きに相当) を算出した (以降、これをCvc [単位: mm<sup>2</sup>/mmHg] と呼ぶ)。

#### 1. 5 Cvc測定の実用

##### a) 動脈コンプライアンスとの関連性の検討

上述12名の被検者の11名について、動脈コンプライアンス (Ca) の指標を測定して、Cvcとの関連性を検討した。Caの代表的指標として、Cv測定肢である右下肢へ至る大動脈のPWVを、血圧脈波検査装置 (formPWV/ABI, BP-203RPE-II, 日本コーリン製) で測定した。被検者は水平な台の上に仰臥位姿勢をとり、セッティング終了後から4分おきに1時間、連続して測定を行った。40分目以降にえられた、安定した測定値を平均して、各被検者のPWVとした。

##### b) 弾性ストッキング装着効果の検討

6名の被検者において、下肢、特に下腿部への“むくみ” (浮腫) を抑制する目的で市販されている弾性ストッキング (スリムウオーク, ピップフジモト製, ふくらはぎ部から足首にかけて、徐々に圧迫圧が高くなる仕様) を右側下腿部の膝下の位置まで装着して、CvvおよびCvcを同時に測定し、その効果を検討した。

#### 1. 6 統計処理

データの要約には、平均±標準偏差を用いた。平均値の差の検定には対応のあるt検定を、2変数の関連性の検討には相関係数を用いて行った (SPSS for Windows, Ver. 5)。

## 2. 結果

同一のカフ操作設定条件下でえられた、従来のVCPG法によるCvv推定のための下腿容積の相対変化と、超音波B-モード法によるCvc測定のため

めの膝窩静脈血管径の経時的応答について、それぞれの一例を図1に示した。40分間安静の後、カフ圧を60mmHgに上昇させると、膝窩静脈血管径は速やかに膨張し、その後4分間ほぼ定常状態を示したのに対して(図1:(B)), VCPG法によって記録された下腿容積は定常を示すことなく増大し続けた(図1:(A))。

-1mmHg/sでカフ圧を減圧中にえられた膝窩静脈断面面積とVCPGによる下腿容積変化の一例を示したものが図2である。両者は共に、減圧に伴い、曲線的な変化であった。それぞれの変化から、測定方法の章で述べたような手順に従って、静脈コンプライアンスとしてCvcとCvvが計算された。12名でえられた両値の関連性を示したものが図3である。両者の間には、有意な正の相関が認められた( $r=0.605$ ;  $p<0.05$ )。

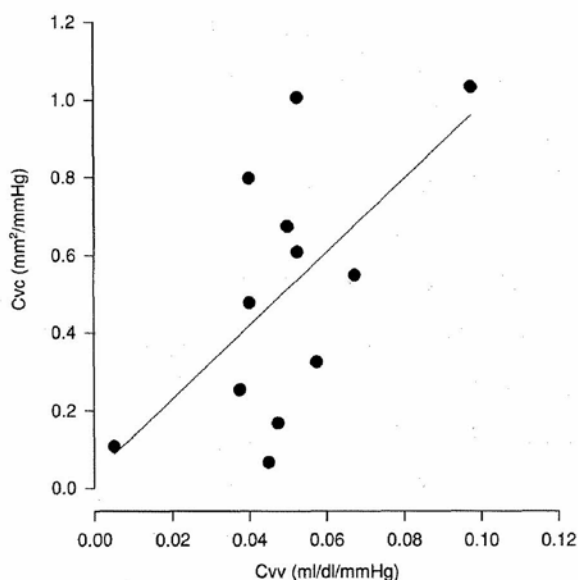


図3 本研究による静脈コンプライアンス測定値(Cvc)と従来の方法による推定値(Cvv)の関係

次に、動脈のコンプライアンスの指標であるPWVとCvcの関係をみると、両者の間には、弱い正の関連性( $r=0.547$ ,  $p=0.081$ )が認められた(図4)。

また、弾性ストッキングの装着の有無によるCvcならびにCvvを、表1に示した。Cvcには、装着の有無による差異は認められなかったが、Cvvでは、装着なしの対照条件に比較して、有意

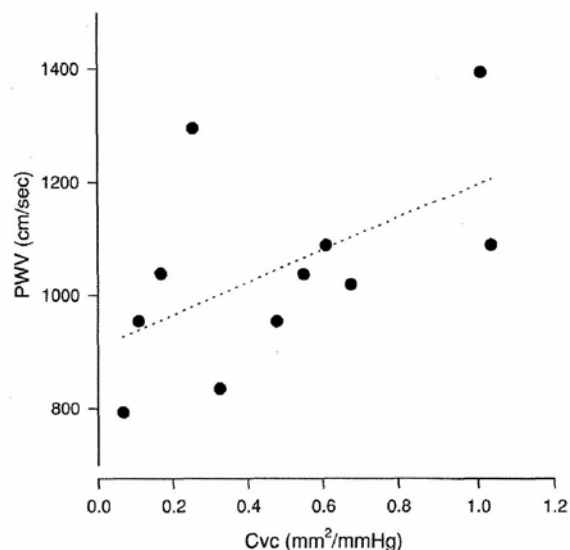


図4 本研究による静脈コンプライアンス測定値(Cvc)と中心大動脈コンプライアンスの指標(PWV)の関係

表1 弾性ストッキング装着有無によるCvcとCvv

	Cvv	Cvc
Elastic compression stocking		
with	0.082 ± 0.018*	0.046 ± 0.016
without	0.041 ± 0.038	0.046 ± 0.025

(mean ± SD) \*;  $p<0.05$

に高い値を示した( $p<0.05$ )。

### 3. 考 察

本研究では、従来のVCPG法による下腿部全体の容積変化から静脈コンプライアンスを推定するという間接的でなく、静脈血管径を直接描画し計測するという方法で、静脈血管(膝窩静脈)固有のコンプライアンス測定法を開発し提案した。急速なカフ加圧時(0-60mmHg)の下腿容積の変化と、膝窩静脈の血管径の変化について比較してみると、膝窩静脈血管は速やかに膨張し、その後4分間ほぼ定常状態を示した(図1:(B))のに対して、VCPG法によって記録された下腿容積は定常状態を示すことなく増大し続けた(図1:(A))。このような伝導性血管膨満後の下腿容積の増大現象は、程度の差こそあれ、すべての被検者で認められた。このことに関して、Gambleら<sup>3)</sup>は、VCPG法によって記録された増大し続ける下



腿容積変化曲線の傾きから、組織間隙への血液の濾過容量 (filtration capacity) の推定を行うという興味深い報告を行っている。すなわち、加圧時の下腿容積の変化には、静脈血管の膨満以外の、たとえば細胞間隙への水分貯留等が含まれる可能性があり、必ずしも静脈血管網の変化のみを反映しているわけではないことが示唆される。さらに、Monahanら<sup>9)</sup>は、VCPG法によってえられた下腿静脈コンプライアンスと下腿部の全組織容積の間に負の相関関係が認められることを報告しており、その原因として、深部の下腿部静脈には、それを取り囲む筋がその伸展性に影響を及ぼし、筋量が多いと下腿部容積変化から推定される静脈コンプライアンスは低く見積もられる可能性があることを指摘している。その点、我々の提唱する、表層の伝導性静脈を描画する方法は、筋量の影響などが少なく、血管のみの伸展性をより直接的に測定できるものと考えられる。

立位作業従事者でよくいわれるような起床時から時間がたつに伴って出現する下腿部全体のいわゆる“むくみ”(浮腫)といった現象が、本研究で提案する血管径描画による測定にも影響を及ぼすか否かを確認しておくために、2名の被検者で、早朝と夕方に、安静仰臥位状態の膝窩静脈血管径を、1時間連続して(10分おきに6回)計測するという実験を追加した。結果として、血管径には、朝一夕に伴う変化、ならびに1時間測定における経時変化は認められなかった。このことから、伝導性静脈の描画によるコンプライアンスの測定方法には、細胞間隙への水分貯留による浮腫の影響はほとんどないことがうかがえる。さらに、“むくみ”軽減のための弾性ストッキングを装着した条件下でのコンプライアンスは、Cvcには装着の有無による差異は認められなかったが、Cvvでは、装着なしの対照条件に比べて、有意に高い値を示した(表1)。本研究で使用したストッキングの特性として、静脈コンプライアンスを評価

したカフ圧変化(40-20mmHg)付近で下腿部加圧効果が存在し、下腿容積変化に影響を及ぼしたものと推察される。また、仮にストッキング装着によって下腿部の浮腫(むくみ)の抑制や、あるいは静脈血管網への筋などの周辺組織からの圧迫といった影響があるとする、血管断面積から測定されるコンプライアンスにストッキング装着の有無で違いが全くなかったことは、我々の提案する方法の頑健性を示していると考えられる。

伝導性の血管を直接描画して、その伸展性を測定しようとする試みは、動脈系では、頸動脈血管を描画し、心臓の1拍動ごとの血管径変動と血圧変動から、頸動脈コンプライアンスを評価する方法がすでに行われている<sup>14)</sup>。この動脈コンプライアンス測定は、動脈硬化ならびにそれに起因する疾病発症予測性に優れており、多くの循環器疾患に関連する臨床領域ですでに活用され始めてきている(例えば、Safarらの総説<sup>12)</sup>を参照)。従って本研究で提案した静脈に対する同様な手法の適用は、そういった既存の考え方とも合致し、受け入れられやすいと予想される。

加齢とともに進行する動脈硬化(動脈コンプライアンス低下)は、習慣的な持久性運動トレーニングによって軽減され、本態性高血圧の発現を抑制する効果のあることがすでに知られている<sup>13)</sup>。同様に、VCPG法によって推定された静脈コンプライアンスにおいても加齢によるその低下を、持久性トレーニングが軽減すると報告されている<sup>8, 9)</sup>。我々は、毛細血管網を介してつらなる動脈と静脈のコンプライアンスの関連性を検討することは意義深いと考え、中心部の大動脈のコンプライアンスの指標であるPWVとCvcを比較することで両者の関係を検討した。両者の間には、弱い正の関連性がうかがわれた( $p=0.081$ )。このことは、動・静脈血管の伸展性には正の関連性がある可能性を示唆し、持久性トレーニングの効果が、動・静脈両者のコンプライアンスを向上させるという

先行研究<sup>8, 9, 14)</sup>とも一致する傾向がみられた。動脈血管のコンプライアンスを規定する要因としては、①動脈壁のコラーゲンに対するエラスチンの割合、②動脈平滑筋のtone (交感神経性の $\alpha$ アドレナリン作動性血管運動tone)の減少、③血管内皮由来の機能的な拡張能 (たとえばNOによる血管拡張など)が候補としてあげられている<sup>13)</sup>。静脈についても同様の規定要因が考えられているが<sup>9)</sup>、上記の②について、交感神経の活性化は静脈コンプライアンスには影響しない<sup>5)</sup>という報告もあり、特に運動の効果については、上記の3つの仮定される要因のいずれがもっとも関与するのかについては明らかではなく、今後の研究課題である。

いずれにせよ、持久性運動トレーニングによる血管伸展性の増大は、動脈血管系では恩恵の効果となるが、容量血管である静脈においては、血液貯留の増大を招き、中心性の血圧低下をひき起こして、起立耐性には負の影響をもたらすという可能性がある。実際に、高度にトレーニングされた持久性選手には起立性低血圧が多いこと<sup>10)</sup>が報告されている。この一見、相反するパラドクスの運動の効果の解明にも、本研究で開発した手法を用いて測定されたCvcにより、その糸口をつかめる可能性があると考えている。

#### 4. まとめ

本研究では、伝導性静脈血管壁のコンプライアンスを測定する新たな測定手法を開発し提案した。この方法は、静脈閉塞プレチスモグラフィ法を用いた従来の推定法に含まれる問題点を解決するために、超音波Bモード法で、膝窩静脈を直接描画し、血管横断面積と静脈内圧の関係から伝導性静脈血管壁のコンプライアンスを測定するものであった。被検者は健康な成人男女12名であった。えられた結果は、以下のとおりである。

1. 仰臥位で40分間安静の後、カフ圧を

60mmHgに上昇させると、膝窩静脈血管径は速やかに膨張し、その後4分間ほぼ定常状態を示したのに対して、静脈閉塞プレチスモグラフィ法によって記録された下腿容積は定常を示すことなく増大し続けた。このことは、従来法による推定値には、細胞間隙の水分貯留が含まれるという問題点を確認することとなった。

2. 静脈圧(カフ圧)が40から20mmHgへと変化する際の膝窩静脈血管断面積および下腿容積の変化から、それぞれ求められたコンプライアンスの関連性を検討したところ、有意な正の相関関係( $p<0.05$ )が認められた。このことから、超音波法(Bモード)による静脈血管描画により、血管自体のコンプライアンスという、より直接的な評価が可能となることが示された。

3. 中心部の大動脈コンプライアンスの指標である大動脈脈波速度と膝窩静脈コンプライアンスの間には、弱い正の関連性がみられた( $p=0.081$ )。このことは、動・静脈血管の伸展性には正の関連性がある可能性を示唆した。

#### 謝 辞

本研究を実施するにあたり、多大なる貢献をいただいた、当研究室の津村亜季君、定久美樹君に感謝の意を表します。また、本研究に対して助成をいただいた、(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に、御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) Asmar R., Topouchian J., Pannier B., Benetos A., Safar M., Pulse wave velocity as endpoint in large-scale intervention trial. The complior study. *J. Hypertens.*, 19, 813-818 (2001)
- 2) Christ F., Gamble J., Baschnegger H., Gartside I.B., Relationship between venous pressure and tissue volume during venous congestion plethysmography in man. *J. Physiol.*, 503, 463-467 (1997)
- 3) Gamble J., Gartside I.B., Christ F., A reassessment



- of mercury in silastic strain gauge plethysmography for microvascular permeability assessment in man. *J. Physiol.*, 464, 407-422 (1993)
- 4) Guyton A.C., A concept of negative interstitial pressure based on pressures in implanted perforated capsules. *Circ. Res.*, 12, 399-414 (1963)
  - 5) Halliwill J.R., Minson C.T. and Joyner M.J., Measurement of limb venous compliance in humans: technical considerations and physiological findings. *J. Appl. Physiol.*, 87, 1555-1563 (1999)
  - 6) Joyner M.J., Dietz N.M., Shepherd J.T., From Belfast to Mayo and beyond: the use and future of plethysmography to study blood flow in human limbs. *J. Appl. Physiol.*, 91, 2431-2441 (2000)
  - 7) 加賀谷淳子；「筋血流の測定」, 人間科学計測ハンドブック (編) 日本生理人類学会計測研究部会, 技報堂出版, 東京, pp.166-174 (1996)
  - 8) Louisy F., Jouanin J.C., Guezennec C.Y., Filling and emptying characteristics of lower limb venous network in athletes. Study by postural plethysmography. *Int. J. Sports Med.*, 18, 26-29 (1997)
  - 9) Monahan K.D., Dinunno F.A., Seals D.R., Halliwill J.R., Smaller age-associated reductions in leg venous compliance in endurance exercise-trained men. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 281, H1267-1273 (2001)
  - 10) Raven P.B., Pawelczyk J.A., Chronic endurance exercise training: a condition of inadequate blood pressure regulation and reduced tolerance to LBNP. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 25, 713-721 (1993)
  - 11) Rowell L.B., "The venous system". In Human Circulation, Oxford University Press, New York, pp.44-77 (1986)
  - 12) Safar M.E., Blacher J., Mourad J.J., London G.M., Stiffness of carotid artery wall material and blood pressure in humans: application to antihypertensive therapy and stroke prevention. *Stroke*, 31, 782-790 (2000)
  - 13) Seals D.R., Habitual exercise and the age-associated decline in large artery compliance. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 31, 68-72 (2003)
  - 14) Tanaka H., Dinunno F.A., Monahan K.D., Clevenger C.M., DeSouza C.A., Seals D.R., Aging, habitual exercise, and dynamic arterial compliance. *Circulation*, 102, 1270-1275 (2000)