

修士学位論文要約（令和4年3月）

## 単一の超音波プローブ押圧下における橈骨動脈壁の粘弾性特性計測に関する研究

庄司 悠人

指導教員：金井 浩， 研究指導教員：荒川 元孝

### Study on Viscoelasticity Measurement of Radial Artery Wall under Pushing Pressure Applied by Single Ultrasonic Probe

Yuto SHOJI

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Mototaka ARAKAWA

An evaluation of vascular endothelial function is important for the early diagnosis of arteriosclerosis. We developed an ultrasound probe that can simultaneously measure blood pressure and vessel diameter at the same position to estimate the elasticity of the radial artery during FMD. However, a change in the cross-sectional shape of the vessel caused by the pushing pressure affects the estimates of the vessel's elasticity. In the present study, we introduced the pulse transit time method to measure the blood pressure not affected by the absolute value of the acquired voltage. As a result, we could measure the decrease in blood pressure associated with the decreases in elasticities by the FMD and the recovery to the resting state after releasing the avascularization. Moreover, we derived a series of equations to estimate the vessel's elasticity considering the pushing pressure applied by the ultrasound probe and the resultant deformation of the blood vessel. The method was applied to *in vivo* measurements. The proposed method resulted in fewer variations in the elastic modulus estimates with different pushing pressures compared with the conventional method.

#### 1. はじめに

動脈硬化症の早期診断・早期治療には血管内皮機能の評価が重要である。我々は血流依存性血管拡張(FMD)反応中の弾性率の変化を計測することで、血管内皮機能を直接的に評価することを目指し、血管径と血圧を同時に計測できる超音波プローブを開発した。超音波プローブで血圧を計測するためには押圧を加え、血管を押しつぶす必要があり、押圧の変化や血管の変形が弾性率の計測値に影響を与える。本研究では、超音波プローブによる押圧や血管の変形に影響されない弾性率の推定を目指し、脈波伝搬時間を用いた血圧校正法の導入と、押圧と血管形状を考慮した弾性率推定式の導出を行った。

#### 2. 脈波伝搬時間を用いた血圧校正

超音波プローブで取得した血圧波形は電圧として出力されるため、血圧値に校正する必要がある。先行研究<sup>2)</sup>においては予め上腕式血圧計で計測した収縮期血圧 $p_{sys}$ および拡張期血圧 $p_{dias}$ を用いて血圧波形を校正していたため、計測中に超音波プローブによる押圧が変化すると、取得電圧の絶対値の変化に伴い血圧値が変化するという課題があった。本研究では脈波伝搬時間法による血圧推定を導入し、押圧変化によらない血圧計測を可能とした。

脈波伝搬時間法の有用性の確認のため、20代前半の健常男性3名を被験者A~Cとし、右橈骨動脈を対象にFMD反応時における粘弾性計測を行った。改造した7.5MHzの超音波プローブを用いて血圧波形と血管径変化を計測した。血管断面を円形と仮定し、血管径変化から血管円周方向のひずみを算出した。血圧一周方向ひずみ特性をVoigtモデルに最小二乗法を用いて整合することで粘弾性率を推定した。まず安静時において30秒ごとに5分間計測を行い、5分間駆血し解放した後、15秒ごとに5分間計測を行った。図1にFMD反応中の血圧変化、図2に粘弾性率の変化を示す。

図1より、すべての被験者において駆血解放後に収縮期血圧 $p_{sys}$ と拡張期血圧 $p_{dias}$ が駆血前と比べて約15mmHg低下し、時間の経過に伴って安静時の値付近まで増加した。弾性率の低下に伴う血管の拡張により、血圧は低下すると考えられるため、この傾向は妥当といえる。一方で、図2より、弾性率と粘性率の推定結果は被験者ごとに異なる傾向を示し、FMDによる血管壁の弛緩を弾性率の低下としては確認できなかった。

#### 3. 超音波プローブによる押圧と血管形状の変化を考慮した弾性率推定

前節において弾性率の低下を計測できなかった

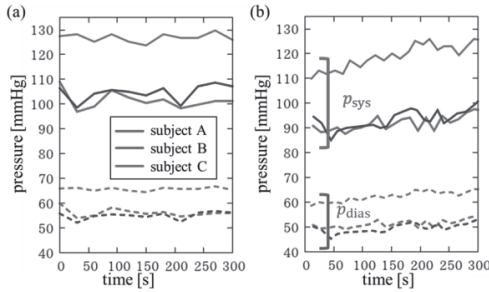


図1 FMD 反応中の血圧の変化(実線:収縮期血圧, 点線:拡張期血圧), (a) 安静時, (b)駆血解放後

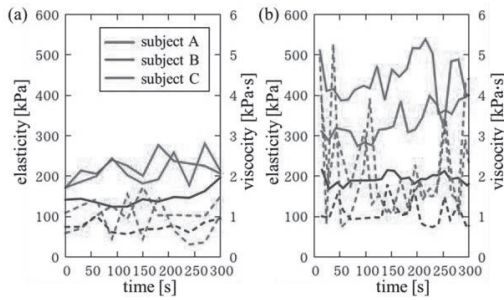


図2 FMD 反応中の粘弾性率の変化(実線:弾性率, 点線:粘性率) (a) 安静時, (b)駆血解放後

原因は、弾性率の推定において、超音波プローブによる押圧およびそれに伴う血管形状の変化を考慮できていないことにありと考へ、押圧と血管形状の変化を考慮した弾性率の推定式を導出した。変形後の血管断面の形状を楕円と仮定し、血管壁内にかかる貫壁方向応力 $\sigma_r$ 、周方向応力 $\sigma_\theta$ を導出した。<sup>3)</sup> 超音波により血管の長径および短径、改造された超音波プローブにより血圧、圧力センサ(KYOWA, PS-1KC)により超音波プローブによる押圧 $p_3$ を計測した。これらから、拡張期から収縮期における貫壁方向増分応力 $\Delta\sigma_r$ 、周方向増分応力 $\Delta\sigma_\theta$ を算出した。超音波によって計測した血管短径の変化から、血管壁の周方向歪み $\Delta\varepsilon_\theta$ を算出した。 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\Delta\varepsilon_\theta$ を式(1)に代入することにより、弾性率 $E$ を推定した。

$$E = \frac{3}{4\Delta\varepsilon_\theta}(\Delta\sigma_\theta - \Delta\sigma_r) \quad (1)$$

導出した式の有用性を確認するため、20代前半の健康男性3名を被験者D-Fとし、3通りの押圧 $p_3$ 下において右橈骨動脈を対象に安静時の血圧波形および血管径の変化を計測した。連続する3心拍で、従来法と提案法で弾性率を推定し、比較した。

図3に、1名の被験者Dに対する、提案法および

従来法によって推定した弾性率の3心拍間の平均値の関係を示す。従来法では押圧によって弾性率の推定値が全体の平均値から最大で $-36\sim+25\%$ 程度変化してしまうのに対し、提案法では $-7\sim+3\%$ 程度と大幅に小さくなった。提案法により押圧の変化が弾性率推定に与えていた影響を大きく低減できたといえる。しかし、提案法においても押圧を大きいほど、弾性率の推定値がわずかに低下した。この原因の1つとして、ひずみを算出する際に血管断面を円形と仮定していることが考えられる。超音波プローブの押圧により、血管断面は楕円に変形し、押圧を強くするほど楕円のアスペクト比が大きくなる。また、楕円に内圧を付加すると、長径方向よりも短径方向に大きく変形するため、本研究におけるひずみの算出式では、楕円が潰れるほどひずみが大きく算出される。一方、ひずみの算出時には円形から円形への変形を仮定しているため、押圧が大きくなり、円形から離れた形状となるほどひずみの算出の誤差が大きくなり、弾性率の推定値への影響が大きくなると考えられる。

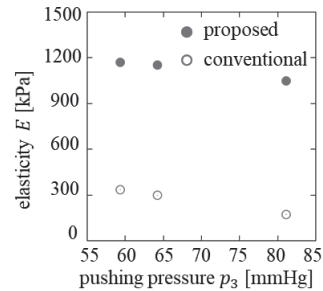


図3 提案法と従来法による弾性率の推定結果

#### 4. まとめ

超音波プローブによる押圧の影響を受けずに橈骨動脈壁の弾性率を推定するために、血圧の校正方法および弾性率の推定式について検討した。脈波伝搬時間を用いた血圧推定法の導入、および押圧と血管形状を考慮した弾性推定式の導出によって、超音波プローブによる押圧が弾性率の推定値に与える影響を大きく低減できた。

#### 参考文献

- 1) M. Arakawa, T. Saito, S. Mori, S. Ohba, K. Kobayashi, and H. Kanai, *Sens. Actuators., A*, **297**, (2019).
- 2) T. Saito, S. Mori, M. Arakawa, S. Ohba, K. Kobayashi, and H. Kanai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, (2020).
- 3) Y. Shoji, S. Mori, M. Arakawa, S. Ohba, K. Kobayashi, and H. Kanai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, (2022, in press).