

(平成 14 年 3 月修了)

動脈硬化症の診断を目指した動脈壁厚み変化計測に最適な 超音波ビーム形状に関する研究

渡辺 優, 長谷川英之, 金井 浩, 小岩喜郎

Optimization of Condition on Ultrasonic Beam for Measurement of Small Change in Thickness of Arterial Wall

Masaru WATANABE, Hideyuki HASEGAWA, Hiroshi KANAI, Yoshiro KOIWA

We have previously developed a method for measurement of the small change in thickness of the arterial wall during one cardiac cycle. Knowledge of this change in thickness is useful for *in vivo* assessment of the regional elasticity of the arterial wall. In this study, from the computer simulations, it is found that measurement error depends on the distance of the ultrasonic beam from the center of the artery and that it can be reduced by optimally setting the focal position. In basic experiments using a silicone rubber tube and in *in vivo* experiments with a human carotid artery, it is found that by optimizing the focal position, measurement of the change in thickness becomes more robust against mispositioning of the ultrasonic beam. From these results, it is demonstrated that optimum focal position provides more robustness in measurement, even if there is arterial wall motion which causes the position of the ultrasonic beam to deviate from the center of the artery. From results of *in vivo* measurements for 57 subjects, it is found that the evaluation of elastic modulus in the intimal side is more effective for diagnosis of early-stage atherosclerosis.

1. はじめに

著者らは、拍動による動脈壁の微小振動速度を高精度に計測する位相差トラッキング法を提案している¹⁾。さらに、得られた壁の振動速度から拍動にともなう数十 μm という壁の微小な厚み変化を算出し、上腕における血圧を用いて頸動脈壁の心一拍中の平均的な弾性率を算出する方法を提案している²⁾。

計測時には、超音波ビームは血管の中心軸を通過し、壁と直交することが望ましい。本研究では、血管中心軸と超音波ビームの距離の増大にともなう計測精度の低下について検討を行い、血管壁内膜が明瞭に認識できる条件下ならば、血管壁と超音波ビームはほぼ直交しており、精度良く厚み変化が算出できることを示した^{3,4)}。本論文では、計算機模擬実験、水槽模擬実験、*in vivo* 実験により、このような超音波ビームの位置ずれの影響を抑制するための超音波焦点位置について検討を行う。さらに、動脈壁弾性率計測を多数の被験者に適用し、早期動脈硬化症診断の可能性の検討を行う。

2. 超音波焦点距離の検討

計算機模擬実験 実際に動脈壁厚み変化計測で用いる超音波プローブを、複数の点音源を設定することで模擬し、頸動脈を厚肉円筒管で模擬する。円筒管壁には正弦的な厚みの時間変化を与えた。超音波プローブの各素子からの送信波は円筒管上に設定した散乱体で反射され、プローブの各素子で受信される。得られた受信波より位相差トラッキング法を用いて円筒管壁の厚み変化を算出する⁵⁾。

各音源毎に設定している超音波送受信における遅延時間を変えることにより、超音波プローブの音響レンズ焦点距離 $d_{f,ac}$ を変化させる。焦点距離を 5 mm から 41 mm まで変化させ、各焦点位置毎に血管中心軸と超音波ビーム位置の距離 d_l をパラメータとし、円筒管壁の厚み変化計測精度を評価する。計測対象の円筒管壁は深さ 19 mm にある後壁である。

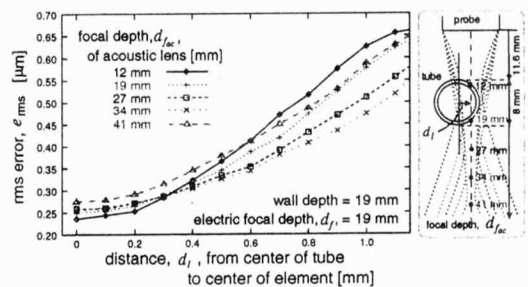


図 1: 計算機模擬実験における d_l と厚み変化計測精度の関係。

図 1 にプローブ、円筒管、焦点距離の位置関係と計測精度算出結果を示す。図 1 の結果より、円筒管壁より焦点位置を後方に設定することで d_l 増加の影響による精度低下を抑制できることが分かる。これは、焦点距離設定を変化させたことにより超音波ビームの幅が広がり反射率が増加することで、 d_l 増加の影響を受けにくくなったためと考えられる。
水槽実験 血管を模擬したシリコンチューブを用い、人工心臓により拍動流を与え、管壁に生じる厚み変

化を計測する。超音波ビーム形状は、プローブの電子フォーカス距離を変えることにより、変化させる。実験で用いるシリコンチューブの弾性率、拍動流による内圧変化から算出した、管壁に生じる厚み変化振幅の理論値は4.1 μm である。

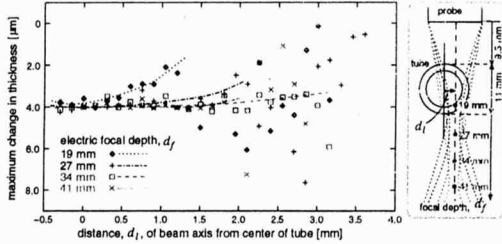


図2: 水槽実験における d_1 と厚み変化振幅値の関係。

図2に d_1 をパラメータとして計測した厚み変化振幅値を示す。図2の結果より、超音波ビーム位置とシリコンチューブ中心軸との距離 d_1 が0.5 mm以内であれば、いずれの焦点距離設定においても高精度に計測可能であることが分かる。一方、計測位置ずれ d_1 が0.5 mmより大きい場合、焦点距離によって精度が大きく変化しており、シリコンチューブの管壁より焦点距離を後方に設定することで計測位置ずれ d_1 の影響による精度低下を抑制できることが分かる。これは図1に示した計算機模擬実験の結果と一致している。

in vivo 実験 頸動脈壁の拍動による厚み変化を計測する。被験者は28歳、健常者である。超音波ビーム形状は、水槽実験同様、プローブの電子フォーカス距離を変えることにより変化させる。各焦点位置設定において超音波ビーム位置と血管中心軸との距離 d_1 が0のときの厚み変化振幅値を1とし、 d_1 における厚み変化振幅値との比を、図3に示す。

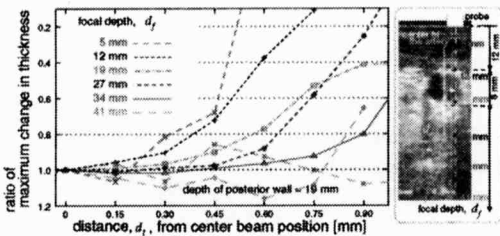


図3: *in vivo* 実験における d_1 と厚み変化振幅比の関係 (被験者28歳、健常者)。

図3の結果より、超音波ビーム位置と血管中心軸との距離 d_1 が0.4 mm以内であれば、どの焦点距離設定においても高精度に計測可能であることが分かる。一方、計測位置ずれ d_1 が0.4 mmより大きい場合、焦点距離によって精度が大きく変化しており、血管壁より焦点距離を後方に設定することで計測位置ずれ d_1 の影響による精度低下を抑制できることが分かる。これは図1、2に示した計算機模擬実験、水槽実験の結果と同様である。

3. 早期動脈硬化症診断の検討

集団検診の2次検査として母数約2000名のうち150名程度の心疾患リスクファクタの高い被験者に対し本計測法を適用した。頸動脈に動脈硬化性病変の認められない被験者57名に対し計測を行い、血管壁内中膜を内腔側、中央、外側に均等な厚みに3分割した。各層毎の平均弾性率を算出した結果を、心疾患リスクファクタに対しプロットした結果を図4に示す。

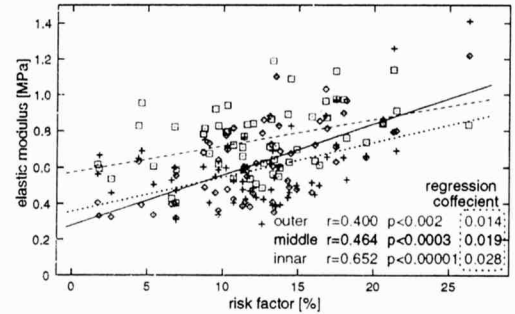


図4: 各層毎の平均弾性率と心疾患リスクファクタの関係。

図4の結果より、血管内腔側の平均弾性率と心疾患リスクファクタとの相関は高く、回帰係数が大きい。このことから、血管内腔側の弾性特性に注目することにより、より早期の動脈硬化症診断が可能になると考えられる。

4. 結論

本論文では、計算機模擬実験、水槽模擬実験、*in vivo* 実験により、超音波ビームの位置ずれの影響を抑制するための最適な超音波焦点位置について検討を行った。計算機模擬実験の結果から、計測対象物の円筒管壁より後方に焦点位置を設定することにより、計測位置ずれによる精度低下を抑制できることが分かった。また、水槽実験、*in vivo* 実験において同様の結果が得られた。さらに、本計測を上記のように検討した条件下で多数の被験者に適用した。その結果、血管内腔側の弾性率を計測することで、より早期の動脈硬化症診断が可能になると考えられる。

文献

- 1) H. Kanai, M. Sato, Y. Koiwa, and N. Chubachi: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **43**, (1996) 791-810.
- 2) 長谷川英之, 金井 浩, 星宮 望, 小岩喜郎: *超音波医学*, **28**, (2001) 3-14.
- 3) M. Watanabe and H. Kanai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, (2001) 3257-3261.
- 4) 渡辺 優, 長谷川英之, 金井 浩: *日本音響学会誌* (2001) (査読終了, 印刷中).
- 5) M. Watanabe, H. Hasegawa and H. Kanai: *Jpn. J. Appl. Phys.* (2002) (査読終了, 印刷中).