

超音波検査の技術と臨床

I. 基礎

2. 新しい手法

6) 硬さの評価法 (2) 血管壁

金井 浩 長谷川英之 小岩 喜郎 手塚 文明 市来 正隆

臨床検査

第45巻 第11号(増刊号)別刷

2001年10月30日発行

医学書院

2. 新しい手法

6) 硬さの評価法 (2) 血管壁

金井 浩¹⁾/長谷川英之²⁾/小岩喜郎³⁾/手塚文明⁴⁾/市来正隆⁵⁾

はじめに

動脈硬化症における様々な病態は血管壁に生じた粥腫の物理的脆弱性(易破裂性)により引き起こされると考えられ、粥腫病変の易破裂性が医学上の大きなトピックとなっている。例えば、心筋梗塞・不安定狭心症・突然死にも冠血管内粥腫の易破裂性の関与が大きいと考えられており、分子生物学的なアプローチを含め様々な方向から積極的な検討がなされている。しかし、個々の患者の粥腫の易破裂性を、その内部物性にまで踏み込んで把握しうる方法は開発されていなかった。例えば、従来血管の硬さとして臨床の場で測定されてきたものは、脈波伝播速度あるいは stiffness parameter などの、血管長軸方向や横断面での平均的で、かつ壁厚・内径比によっても影響され

る指標に限られていた¹⁾。これに対し、最近開発された「位相差トラッキング法」では、心臓・血管壁の内部数百ミクロンの厚さの層ごとの瞬時的な厚み変化の速度を経皮的に高精度に計測でき、壁にかかる脈圧を考慮することで、血管壁の層別の弾性値を描出し得る²⁻⁶⁾。

“位相差トラッキング法”の原理^{2,3)}

従来のエコー法などでは心室壁や血管壁の変位の1拍内での微小変化を検出するには、それを数ミクロンという高精度で検出しようとすれば、拍動自体による十数 mm の変位が大きく影響して計測は不可能となる。これに対し位相差トラッキング法では、胸壁上から送信したパルス状超音波に対する、心臓壁/動脈壁内部の多数の測定点からの反射波の位相遅れを制約付き最小自乗法を用

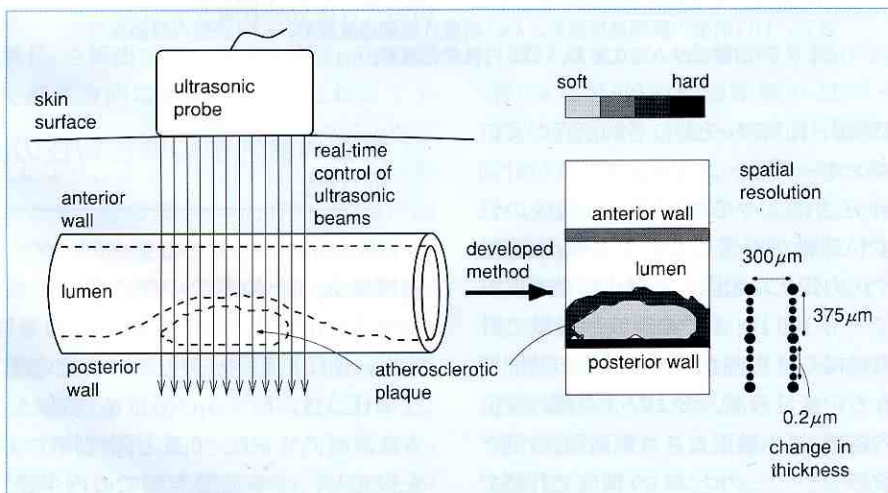


図1 位相差トラッキング法による粥腫内局所弾性特性の空間分布の描出

- 1) KANAI Hiroshi 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻・教授
- 2) HASEGAWA Hideyuki 同専攻
- 3) KOIWA Yoshiro 東北大学大学院医学系研究科・助教授
- 4) TEZUKA Fumiaki 国立仙台病院臨床研究部・部長
- 5) ICHIKI Masataka JR 仙台病院外科・副病院長

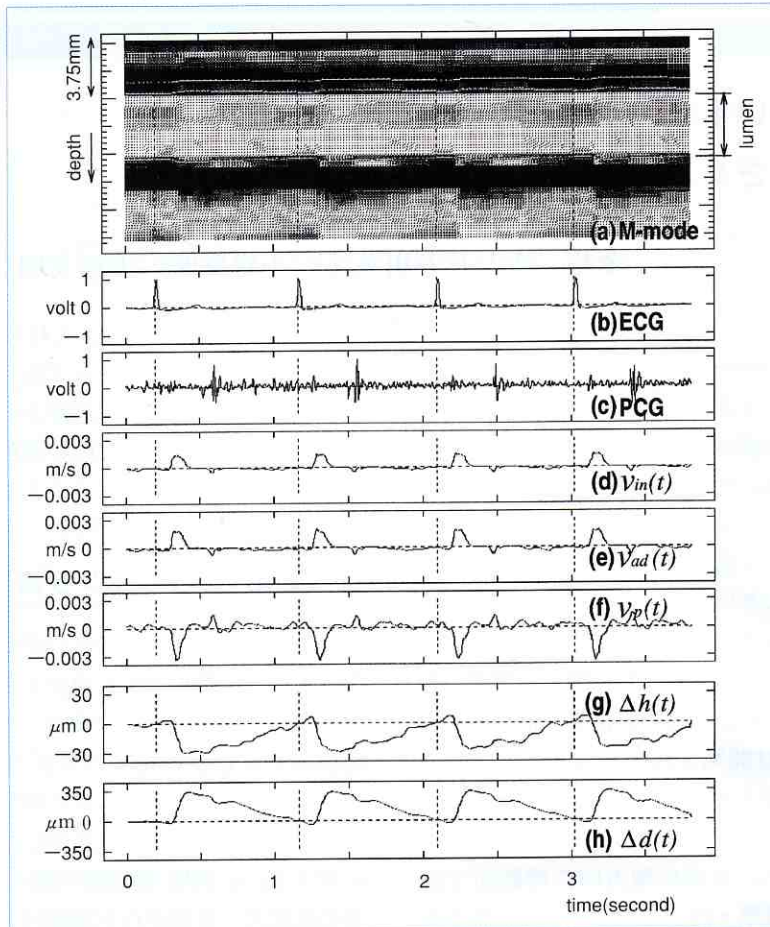


図2 総頸動脈(36歳男性高脂血症患者)の *in vivo* 計測例
 (a) Mモードに壁変位運動トラッキング結果を重ね表示, (b)心電図, (c)心音波形, (d)前壁内膜側速度波形, (e)前壁外膜側速度波形, (f)後壁内膜側速度波形, (g)前壁の厚み変化波形, (h)内径変化波形。

いて高精度に検出し、これを基に各測定点の変位をサブミクロンオーダーでトラッキングし変位計測を行う。この方法によって数~10 mm 前後の低周波大振幅変位運動が重畳している心臓/血管壁の、筋収縮や圧力変化に起因する微小振動速度波形が、少なくとも 100 Hz までの周波数帯域で計測でき、さらに得られた各点の速度波形の時間積分から、それらの変位波形、および2点間の変位の差から壁内各層(厚さ数百ミクロン)ごとの刻々の厚み変化波形をサブミクロンという精度で計測できる。本計測を動脈壁に適用する際には、通常のリニア型超音波プローブ(中心周波数 7.5 MHz)を経皮的に用いればよい。

粥腫病変内部の弾性特性の断層像の描出法

壁厚が最も厚くなる拡張末期のタイミングでの壁厚を h_d 、一拍内での厚み変化の最大値を Δh とする ($\Delta h < 0$)。血圧の脈圧 (Δp) を同時に求めると、血圧の範囲における血管壁の径方向平均弾性率 (E_r) は、 $E_r = \Delta p / (\Delta h / h_d)$ で与えられる。さらに、ポアソン比 = 0.5 と弾性特性の壁内等方向性を仮定し、 r_d を拡張末期での内半径とおけば、円周方向の弾性率 E_θ を、 $E_\theta = 0.5(r_d / h_d + 1) \times \Delta p / (\Delta h / h_d)$ と算出できる⁶⁾。

この計測を粥腫内のすべての微小領域について行うために、図1に示すように、1本の超音波ビーム上で、厚さ 0.375 mm の層を最も内腔側の

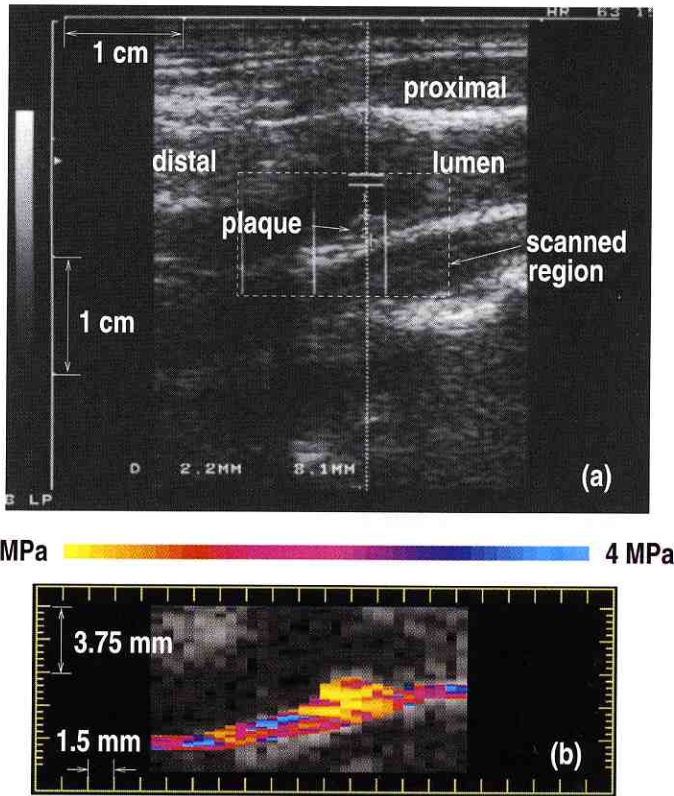


図3 総頸動脈(52歳男性高脂血症患者)の *in vivo* 計測例
 (a) Bモード断層像に(b)での処理領域を点線表示, (b)局所弾性率の断層像。

点に設定し, その層の厚み変化の最大値 Δh および上腕動脈でのカフ圧による脈圧 Δp から, 円周方向弾性率 E_θ を算出する. 厚さ 0.375 mm の層の設定点を深さ方向に 0.075 mm ごとにシフトしながら各深さにおいて円周方向弾性率 E_θ を算出することにより, 深さ方向の弾性率の分布が得られる. ここで, 層の厚さ(=0.375 mm)は, 超音波パルスの半値幅から決定した. さらに血管軸に沿って, リニア型プローブから 30 本の超音波ビームをほぼ同時に送信することによって, この画像内の点線四角の横 18 mm × 縦 9.4 mm の領域に 30 点 × 125 点を設定し, 各設定点において, 上述の手法で厚み変化 Δh と円周方向弾性率 E_θ を計測して得られた, 弾性率断層像を得ることができる. 深さ方向(血管の半径方向)と軸方向の空間分解能は, おおの 375 ミクロン(=1.8 波長)と 600 ミクロンである.

粥腫内弾性特性の断層像の計測例

図 2 は上から, 血管壁に粥腫のない高脂血症患者(36 歳男性)の総頸動脈の M モード像, 心電図, 血管前壁内腔面・外膜面・後壁内膜面でののおの微小振動波形, 血管前壁の厚さの変化 $\Delta h(t)$, 血管内径の時間的な変化 $\Delta d(t)$ を示す. 血圧の上昇により血管壁は約 30 ミクロンほど薄くなっているが, この 3 拍でわかるように各信号とも再現性良く測定されている.

図 3(a) は, 高脂血症患者(52 歳男性)の総頸動脈後壁にみられた粥腫の B モード像を示す. 従来の超音波像からは粥腫内の組成あるいはその易破裂性について推定することは不可能である. この画像内の点線四角の横 18 mm × 縦 9.4 mm の領域に 30 点 × 125 点(合計 3,750 点)を設定し, 各設定点において, 上述の手法で得られた弾性率断層像を図 3(b)に示す. この弾性イメージは, まるで粥腫にメスで縦に割を入れたように粥腫内

部の弾性値を観察した像を表している。これらの弾性率断層像から、例えば、粥腫の中心にある脂質/泡沫細胞層と考えられる柔らかい部分の存在とその弾性値、その周囲にある硬い線維組織と思われる層の厚さ、そして境界部の状態など、従来の方法では決して得られない情報が明らかになっている。

剖検で得たヒト腹部大動脈の粥腫標本についての圧縮弾性値と組織所見の対応から、Leeらは、組織性状すなわち主として細胞によるもの、線維成分によるもの、そして石灰化しているものでは大きく弾性値が異なっており、弾性値と組織性状に密接な関係があることを報告している⁷⁾。図3の症例は頸動脈後壁に粥腫があるが、この弾性率断層像からは粥腫の内面に非常に柔らかいものが存在しその内腔面を弾性的な硬い層が覆っており、内部での柔らかい層は脂肪層、外部は強靱な線維性の被膜と考えられる。柔らかい部分が易破裂性にそのまま関与するか否かは今後検討すべき問題であるが、弾性値の不均一な境界こそが異常なストレスの作用する箇所であろうと考えられる。

おわりに

頸動脈における動脈硬化・粥腫病変の有無は、その重症度が一致するか否かは明らかではないにしても、脳動脈病変や冠動脈病変の有無と相関するという報告が多い⁸⁻¹⁰⁾。従来の動脈病変の測定法としては血管内腔の狭窄を血流のイメージで表現する血管造影検査・MR アンギオグラフィー・CT 検査法などが報告されているが、局所病変たる粥腫について、易破裂性、進展・退縮という諸問題について十分な精度で評価しうる計測法はいまだに報告されていない。新たに開発された高精度計測法は、粥腫内部の物性などを非侵襲的に測定する方法であり、高齢者や心不全、心筋梗塞患者などのように重篤な状態にある患者でも安全

に繰り返し計測しうるものである。この計測法によって粥腫内物性が簡便にかつ短時間で定量的数値として得られることは、“現在行っている治療法が果たして粥腫を安定化させ、線維層優位のものにしているのか否か”という問いに対して新たな知見を加えうるものとおおいに期待できる。

文 献

- 1) Hansen F, Mangell P, Sonesson B, et al : Diameter and compliance in the human common carotid artery—variations with age and sex. *Ultrasound Med Biol* 21 : 1-9, 1995
- 2) Kanai H, Sato M, Koiwa Y, et al : Transcutaneous measurement and spectrum analysis of heart wall vibrations. *IEEE Trans. UFFC* 43 : 791-810, 1996
- 3) Kanai H, Hasegawa H, Chubachi N, et al : Noninvasive evaluation of local myocardial thickening and its color-coded imaging. *IEEE Trans. UFFC* 44 : 752-768, 1997
- 4) Kanai H, Koiwa Y, Zhang J : Real-time measurements of local myocardium motion and arterial wall thickening. *IEEE Trans. UFFC* 46 : 1229-1241, 1999
- 5) 長谷川英之, 金井浩, 中鉢憲賢, 他 : 動脈壁厚変化の非侵襲的高精度計測による動脈壁弾性率の評価. *超音波医学* 24 : 851-860, 1997
- 6) 長谷川英之, 金井浩, 星宮望, 他 : 不均一な壁厚を有する管の局所壁弾性率の計測法. *超音波医学* 28 : J 3-J 13, 2001
- 7) Lee RT, Grodzinsky AJ, Frank EH, et al : Structure-dependent dynamic mechanical behavior of fibrous caps from human atherosclerotic plaques. *Circulation* 83 : 1764-1770, 1991
- 8) Chambers BR, Norris JW : Outcome in patients with asymptomatic neck bruits. *N Engl J Med* 315 : 860-865, 1986
- 9) Salonen JT, Salonen R : Ultrasound B-mode imaging in observational studies of atherosclerotic progression. *Circulation* 87 (Suppl II) : II-56-II-65, 1993
- 10) Riley WA, Freedman DS, Higgs NA, et al : Decreased arterial elasticity associated with cardiovascular disease risk factors in the young-Bogalusa heart study. *Arteriosclerosis* 6 : 378-386, 1986