

1996年：位相差トラッキング法による 微小振動・厚み変化計測の開発

1999年：金井・長谷川・小岩ら 動脈壁 弾性特性計測システムのリアルタイム化

金井 浩

(東北大学大学院工学研究科)

概要

「位相差トラッキング法」は、医用超音波診断装置で用いられる「縦波」超音波を、通常のように画像表示のために用いるのではなく、生体内の組織や臓器の微小振動速度を「時間波形」として高精度に得るための計測手段として用いる¹⁾。生体内のサブミクロンオーダーの振幅の微小振動を、100Hz程度までの周波数帯域にわたり計測が可能であり、この特長は、通常の超音波診断装置の断層像上では把握できない、「微小で速い振動成分」の可視化を可能としている。また、1本の超音波ビーム上に設定した2点において速度波形を同時計測し、さらにそれらの「速度波形の空間的な差」を時間積分することで、2点間に生じる「厚み変化・距離変化」の高精度計測も可能としている。これらの手法は、すでにヒト心臓に適用され、(1)心音の発生するタイミングに心臓弁の閉鎖などに伴って発生した微小振動である「横波」が心臓壁を伝播する様子の可視化、(2)その伝播速度の周波数依存性から心筋の粘弾性特性の決定、あるいは、(3)心電図Q～R波の時間に収縮のもととなる「電氣的興奮」が心室中隔壁を伝播することで、心筋が僅かに動き、その動きが伝播する様子の可視化などに成功している。一方、動脈壁に適用し、(4)1拍間に、血圧が上昇し血管壁が数十マイクロ

だけ薄くなる様子の可視化、さらに、(5)その厚み変化と脈圧から動脈の「壁の弾性特性の空間分布」の非侵襲的可視化、(6)あらかじめ求めておいた脂質や線維組織の弾性特性と比較することでの「動脈壁や粥腫内組織の分類」にも成功している。これらの成果は、局所ごとの心筋の「収縮機能」や組織性状の診断、心臓の収縮弛緩の複雑な遷移過程の機序の解明、動脈硬化症による動脈壁の硬さの増加、粥状動脈硬化症における「病変部の易破裂性の診断」の定量化に今後期待されている。

位相差トラッキング法の計測原理¹⁾

超音波診断装置の超音波プローブから送信された超音波パルスは、微小振動している心臓・動脈壁で反射されて超音波プローブに戻るまでに、伝播距離による位相遅れが生じる。位相差トラッキング法では、深さ d における反射・散乱波の直交検波信号から、連続する2つのフレームにおいて送受信された超音波パルス間の位相差 $\Delta\theta_d(t)$ を、制約付き最小二乗法から得られる複素相互相関関数により決定する。検出された位相差 $\Delta\theta_d(t)$ をもとに、2つのフレーム(時間間隔 T)間の対象物変位 $\Delta x_d(t)$ あるいは $\Delta x_d(t)$ を T で除して T 間の平均速度を算出できる。得られたフレーム間変位 $\Delta x_d(n)$ を積算することで変位 $x_d(t)$ が得ら

れる。以上の処理を、深さ d ごとに適用することで、超音波ビームに沿った変位時間波形の空間分布 $\{x_d(t)\}$ が得られる。

心臓壁振動・厚み変化の高時間分解能計測²⁾

図1(a)は健常者のBモード断層像である。通常のBモード断層像のフレームレートは数十Hzに制限されることから、図1(a)の白い矢印で示すように超音波ビームの走査間隔を粗くして、500Hz程度の高フレームレートを実現して(sparse scan)、計測された速度波形を図1(b)に示す。6心

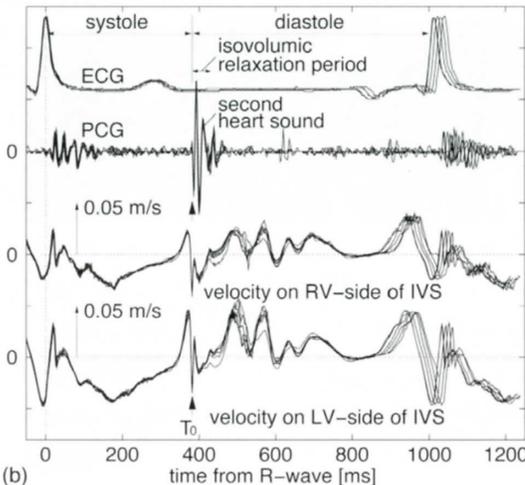
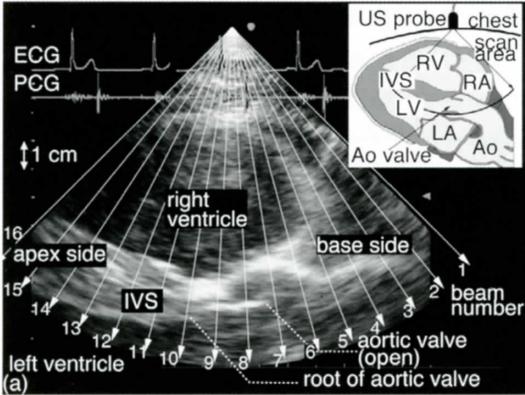


図1. 21歳健常男性の心臓の計測結果。

(a) Bモード断層像。(b) (上から) 6心拍分の心電図、心音図、(a)の13番目ビーム位置で計測された心室中隔壁の右室側および左室側の速度波形。

拍分を重ねてあるが、大動脈弁閉鎖のタイミング T_0 で非常に鋭いパルス形状の波形も再現性良く計測できている。

図2は、心臓壁の振動速度のビーム(深さ)方向分布を計測し、深さ方向2点の振動速度の差から、単位厚み当たりの厚み変化速度 $[(m/s)/m]$ を算出したものである²⁾。図2の解析区間は心II音周辺に対応し、フレームレート630Hzである。厚み変化速度は、図左側のカラーバーにしたがいMモード像上にカラー表示している。青色が厚み増加を、黄色が厚み減少を示す。図2(d),(e)は各々心室中隔壁と左心室後壁内に設定した関心点の振動速度を重ねて表示している。図2(a)の厚み変化速度の時間変化から、収縮から弛緩に移行するタイミングは、各々の壁内において深さに依存して異なることが分かる。心室中隔壁では右室側が左室側に対し15ms程度、左室後壁では心外膜側が心内膜側に対して130ms程度先行している。以上のように、高時間分解能で心臓壁振動・厚み変化を計測することで、収縮弛緩の遷移過程を描出することが可能である。

図3は、心臓左室短軸断面における計測結果である³⁾。左心室の短軸断面における心臓壁を円とみなし(Bモード断層像上に示した色の円)、その円の円周上の各点で計測された振動速度波形をフーリエ変換し、40Hz成分の位相をカラー表示したものが図3(a)である。縦軸は角度方向、横軸は時間で心電図R波近傍の時間区間を拡大している。図3(b),(c)には、断層像の点a,b,c,dで示す位置において計測された変位波形および速度波形を示す。心電図R波の時刻より120ms前から心筋の電氣的興奮により生じた振動が中隔壁(点a)から後壁へ(点b→点c→点d)約6m/sで伝播している。これは、心筋の収縮が、点aから両方向ではなく一方に伝播することを示している。このように速い速度(6m/s)の心筋収縮の伝播は、微小な振動を高時間分解能で計測できる本計測法で初めて可能となったと言える。心筋の興奮伝導は虚血などによって影響を受けると考えられ、こ

のような計測は心疾患の診断に威力を発揮すると考えられる。

文献

1) Kanai H, Sato M, Koiwa Y, et al. Transcutaneous measurement and spectrum analysis of heart wall vibrations. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control 1996;43:791-810.

2) 吉新寛樹, 長谷川英之, 金井浩, ほか. 心筋ストレーンレート空間分布の高時間分解能計測による収縮・弛緩の遷移過程の描出. 超音波医学 2007;34(4):439-48.
3) Kanai H, Tanaka M. Minute mechanical-excitation wave-front propagation in human myocardial tissue. Jpn. J. Appl. Phys. 2011;50:07HA01-1-7.

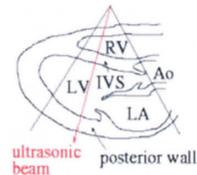
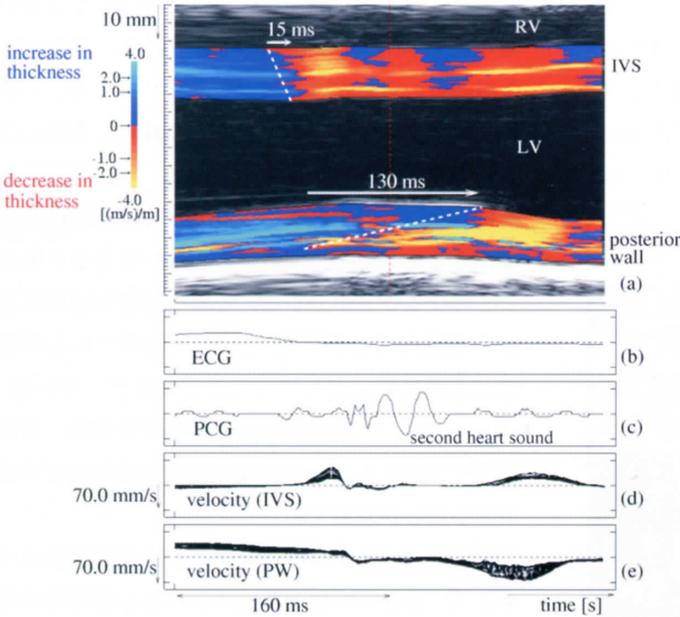


図2. 22歳健康常男性の心臓の計測結果(心音II音周辺).

(a) 心臓壁の厚み変化速度をMモード像上にカラー表示したもの。(b)心電図。(c)心音図。(d)心室中隔壁の振動速度(深さ方向複数点の振動速度波形を重ねてある)。(e)左室後壁の振動速度(深さ方向複数点の振動速度波形を重ねてある)。

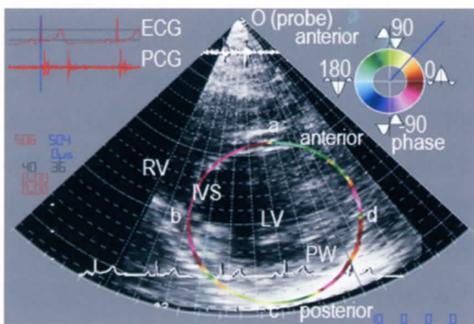


図3. 左室短軸断面における心臓壁振動速度・変位の計測結果(収縮期初期).

最上:左室短軸Bモード断層像(乳頭筋レベル)。(a)振動速度の40 Hz成分の位相をカラー表示したもの。(b)断層像の点cにおける心筋厚み変化波形および点bにおける心筋長さ変化波形。(c)点a~dにおいて計測された振動速度波形。

