

心エコー・ドプラ法を用いた左心機能の評価

大木 崇*, 田畑智継*, 田中英治*

はじめに

臨床医が心疾患における左心機能を知りたい理由は、直面した患者に対して「心機能不全」の有無と適切な治療を行う必要があるか否かについてであろう。肺動脈カテーテルの普及は、急性心不全に対して心機能を客観的に評価することを可能とし、その臨床的有用性については周知であるものの、本手技が観血的アプローチであるため、くりかえし検査を行うことができないという限界を有することも事実である。

近年、心腔内血流動態を評価できるパルス・ドプラ法と、心臓壁運動速度を定量的に計測しうる組織ドプラ法を用いることにより、左心機能に関する詳細な情報を把握することが可能となってきた¹⁾。ここでは、非観血的アプローチであるこれら両検査法を用い、左心機能異常、すなわち心不全をいかに臨床的に評価するかについて解説し、その将来の展望についても若干触れてみたい。

左室心筋の解剖

左室心筋は3層（内層斜走筋、中層輪状筋、外層斜走筋）により構成されている。外層心筋は右上方の心基部線維輪から左下方へ長軸面を斜めに下行し、心尖部でラセン状に回転して心渦を形成した後、反転して内層心筋となり、再び斜めに上行して線維輪に戻る。一方、中層心筋は左右心室を各々別々にループ状に短軸面を走行する。これらの3層心筋はお互いに連絡しあうことにより、効率よく左室の収縮・弛緩に貢献する。

収縮機能の評価

左室の収縮機能についてはポンプ機能（pump function）および収縮性（contractility）を考慮する必要があり、従来、前者の指標としては駆出期の駆出率（ejection fraction）、後者の指標としては等容収縮期の左室圧一次微分最高値（peak dP/dt ）が用いられている。

パルス組織ドプラ法（原理の詳細は文献2を参照）を用いると、左室長軸および短軸方向の壁運動速度を記録することが可能であり、従って各々斜走筋（longitudinal fiber）および輪状筋（circumferential fiber）の収縮・拡張の状況を評価することができる。

傍胸骨（短軸方向）および心尖部（長軸方向）からのアプローチにより左室長軸断層図を記録し、サンプル部位を前者では左室後壁の中層に、後者では左室後壁の心内膜層に設定する（図1、上段）。各々の壁運動速波形を記録すると、短軸方向（circumferential）および長軸方向（longitudinal）における左室の収縮に関する以下のような興味ある所見が得られる（図1、下段）。

①収縮期波は等容収縮期の第1波（Sw1）と駆出期の第2波（Sw2）により構成される³⁾。②正常例における長軸方向のSw1は、長軸方向のSw2や短軸方向のSw1およびSw2に比べてそのピーク速度が有意に大である³⁾。③正常例における長軸と短軸方向のSw2は時相的にほぼ一致するものの、そのピーク速度は長軸に比べて短軸方向の方が大である³⁾。④短軸方向のSw1の開始およびピークは、長軸方向のSw1のそれらに比べてやや遅れて出現する³⁾。⑤長軸方向におけるSw1のピークは左室圧曲線のpeak dP/dt と時相的にほぼ一致し、両者は良好な正相関を示す^{3,4)}。

*徳島大学医学部第二内科

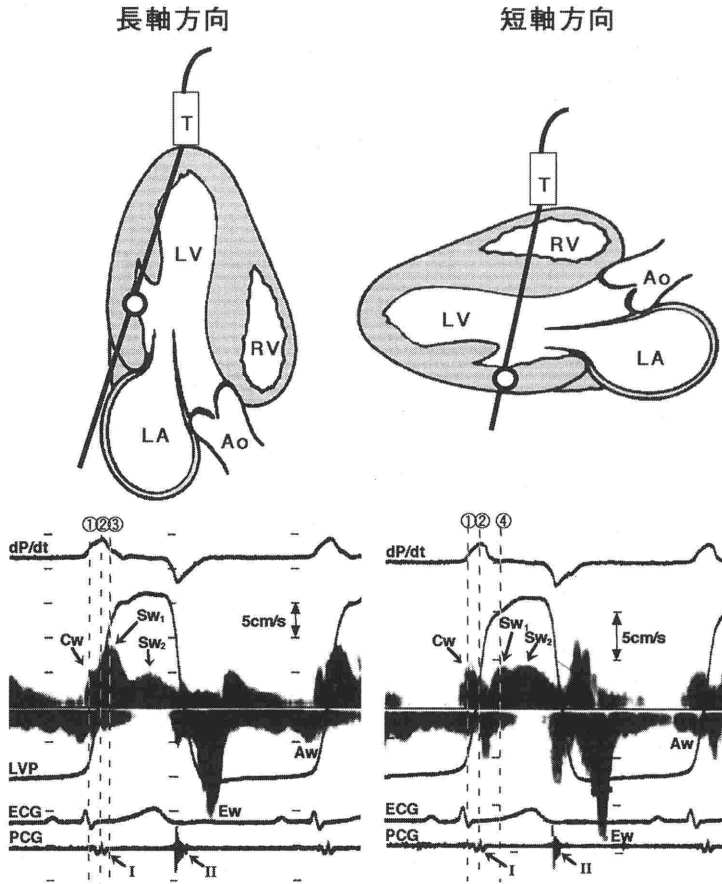


図1 パルス組織ドプラ法による正常例の左室後壁運動速度波形 (文献³⁾より改変引用)

長軸 (左図) および短軸 (右図) 方向のいずれにおいても、収縮期波は等容収縮期の第1波 (Sw₁) と駆出期の第2波 (Sw₂)、拡張期波は拡張早期波 (Ew) と心房収縮期波 (Aw) により構成される。長軸方向の Sw₁ は他の収縮期波に比べて最もピーク速度が大である。FFT 表示による演算時間の遅れ (15~20 msec以内) を考慮すれば、長軸方向における Sw₁ の開始はI音僧帽弁成分 (①) と、ピーク (③) は peak dP/dt (②) とほぼ一致する。また、Ew のピーク速度は長軸に比べて短軸の方が大、Aw のピーク速度は短軸に比べて長軸の方が大である。Cw : 僧帽弁閉鎖に伴う左室壁運動シグナル、④ : 短軸方向における Sw₁ のピークに一致する時相。

⑥正常例において、左室駆出率(ポンプ機能)は加齢により有意な変化を示さないにもかかわらず、長軸方向の Sw₁ は年齢との間に良好な逆相関を示す⁵⁾。⑦長軸方向の Sw₁ は、心筋梗塞における心筋の viability を評価する指標として有用である⁶⁾。

以上の所見を総合すると、正常例における左室心筋の収縮は、収縮初期 (等容収縮期) では長軸方向における斜走筋の収縮が優位 (長軸方向の Sw₁ > 短軸方向の Sw₁)、駆出期では短軸方向に

における輪状筋の収縮が優位 (短軸方向の Sw₂ > 長軸方向の Sw₂) であることが理解できる。また長軸方向における Sw₁ の増大は、回転楕円体である左室が等容収縮期に球状化することに貢献し、駆出期の Sw₂ に比べて左室心筋の収縮機能を鋭敏に反映する指標であると考えられる。

拡張機能の評価

左室拡張機能は、拡張早期における弛緩 (relaxation) と拡張中~末期における流入あるいは

充満 (filling) に大別できる。前者の場合、等容拡張期においては心筋自体の弛緩あるいは active elastic recoil により左室が拡張するものの、僧帽弁開放時 (左房圧と左室圧の交叉点) から左室圧の最下点 (nadir) までの間は、弛緩以外に左房・左室コンプライアンスなどの影響をも受ける。

一方、後者の場合は、僧帽弁の開放から閉鎖までの時期に一致し、この間の血行動態はすべて左房と左室間の圧較差により規定される。したがって左室充満異常は、左室の容量変化 (ΔV) と圧変化 (ΔP) の比、すなわち左室コンプライアンス ($\Delta V/\Delta P$) あるいはスティフネス ($\Delta P/\Delta V$) として表現される。

以上のように、左室の拡張障害は、拡張早期における弛緩異常 (relaxation failure) と、拡張末期におけるコンプライアンス異常 (compliance failure) に大別して考えると理解しやすい。

- 1) 僧帽弁口および肺静脈血流速波形による検討
パルス・ドプラ法(原理の詳細は文献2を参照)により僧帽弁口血流速波形 (transmitral flow velocity : TMF) と肺静脈血流速波形 (pulmonary venous flow velocity : PVF) を記録すると、左室の弛緩およびコンプライアンス異常を評価できる。

正常若年者における TMF は、拡張早期波 (E) と心房収縮期波 (A) により構成される二峰性パターンを示し、通常、 $E/A > 1$ (正常者でも加齢により $E/A < 1$ となる) で、E波のピークからの減速時間 (deceleration time : DT) < 200 msecである (図2, 正常若年者)。

左室弛緩異常を有する例では、左室心筋の能動的弛緩の障害に伴う左室圧下降速度の低下 (時定数 tau の延長) と左室圧最下点 (nadir) の高位により、十分なE波高が得られず、かつE波のピークからの減速も緩徐となる ($DT > 200 \sim 220$ msec) (図2, 弛緩異常)。この拡張早期における血液流入の不足分は、拡張末期における心房収縮の増強により代償される ($E/A < 1$)⁷⁾。TMFがこのような弛緩異常パターンを示す場合は、「肺うっ血」の存在を否定できる。

左室弛緩異常を有する例では、左室心筋の能動的弛緩の障害に伴う左室圧下降速度の低下 (時定数 tau の延長) と左室圧最下点 (nadir) の高位により、十分なE波高が得られず、かつE波のピークからの減速も緩徐となる ($DT > 200 \sim 220$ msec) (図2, 弛緩異常)。この拡張早期における血液流入の不足分は、拡張末期における心房収縮の増強により代償される ($E/A < 1$)⁷⁾。TMFがこのような弛緩異常パターンを示す場合は、「肺うっ血」の存在を否定できる。

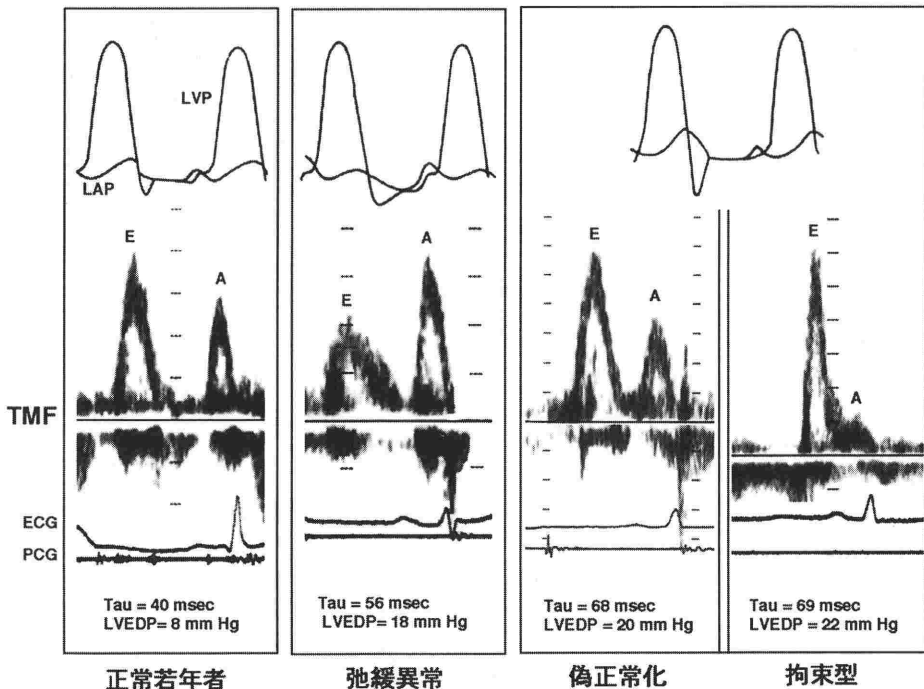


図2 正常および各種病態における左房・左室圧波形と僧帽弁口血流速波形
LVP : 左室圧, LAP : 左房圧, TMF : 僧帽弁口血流速波形, E : 拡張早期波, A : 心房収縮期波, Tau : 左室圧下降脚の時定数, LVEDP : 左室拡張末期圧。

一方、左室コンプライアンスが著しく低下している状況下では、拡張早期における左房圧の上昇により、左室圧との交叉点（僧帽弁開放）がより早期かつ高位となり（等容拡張時間の短縮）、さらに急速流入後の左房圧と左室圧が早期に平衡に達するため、急速流入時間は短縮する（ $DT < 140 \sim 150$ msec）。また拡張末期においては、左室拡張末期圧の著しい上昇のため、心房収縮によっても十分な左室内血液流入が得られないことから（A波高の正常化あるいは減高）、TMFは偽正常化（ $1 < E/A < 2$ ）あるいは拘束型（ $E/A \geq 2$ ）パターンを示すようになる^{8,9)}（図2、偽正常化、拘束型）。TMFがこのようなコンプライアンス異常パターンを示す場合は、「肺うっ血」の前兆あるいは存在が考えられる。

しかしながら、この場合、左室コンプライアンス異常を反映する偽正常化あるいは拘束型パターンはいずれも $E/A > 1$ を示すことから、TMFの記録のみでは正常若年者（ $E/A > 1$ ）との鑑別が困難であり、病態の正しい把握のためにはPVFを併用する必要がある。

近年、a) 左心不全症状（特に肺うっ血）を有する例の30~40%は、左室の収縮（ポンプ）機能が保たれているが拡張機能に異常を認める^{10,11)}、b) 左室収縮機能の低下を認める例において、TMFが偽正常化あるいは拘束型パターンを示す場合の予後は不良である^{12,13)}、ことが明らかになっている。

前者の左室ポンプ機能が保たれている例（肥大型心筋症、高血圧性心肥大、拡張不全が高度な高齢者）は、「拡張不全に伴ううっ血心不全（isolated diastolic failure）」をきたしうる病態に該当する。このような状況下では、左室コンプライアンスの低下に伴い、左室拡張末期圧が上昇するため、心房収縮期における左房から左室への血液流入が制限され（TMFのA波の正常化あるいは減高）、その結果、左室に比べてコンプライアンスの高い肺静脈への血液逆流をきたす[PVFの心房収縮期波（PVA）の増高]^{14,15)}（図3、偽正常化）。このような例にある程度の前負荷が加わると、容易に肺うっ血を招来することになる。また、このPVAはTMFの「正常波形」（図3、正常）と「偽

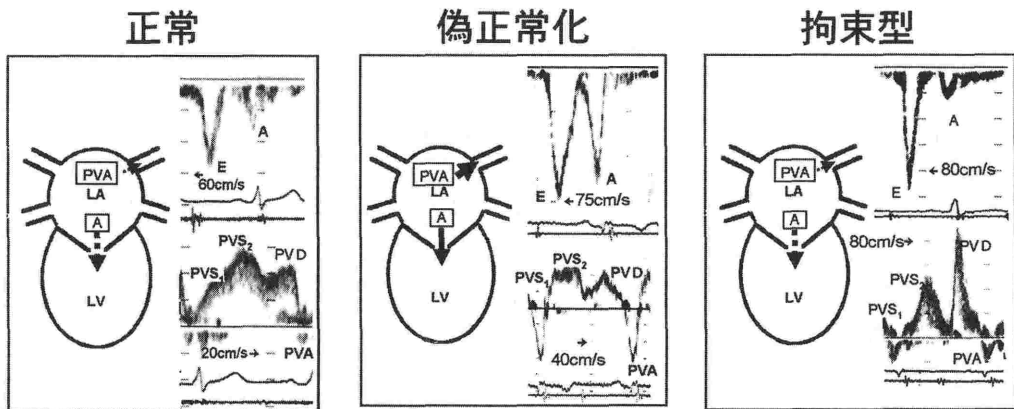


図3 正常および各種病態における僧帽弁口・肺静脈血流速度波形

正常：若年例における拡張期の左室（LV）内血液流入は、拡張早期にその大半が終了するため、僧帽弁口血流速度波形（上段）の拡張早期波高（E）と心房収縮期波高（A）の比（ E/A ）は1より大で、左房（LA）の収縮に伴う左房から肺静脈への逆流（下段、PVA）もほとんどみられない。PVS₁、PVS₂：肺静脈血流速度波形の収縮期第1波および第2波、PVD：肺静脈血流速度波形の拡張早~中期波。

偽正常化：本例は肥大型心筋症例である。僧帽弁口血流速度波形（上段）の E/A は1より大であるため、本波形のみでは「正常波形」との区別は困難である。しかしながら、肺静脈血流速度波形（下段）の心房収縮期波高（PVA）は著明に増高しているため、この僧帽弁口血流速度波形は「偽正常化波形」と判断できる。

拘束型：本例は拡張型心筋症例である。僧帽弁口（上段）および肺静脈（下段）血流速度波形の心房収縮期波高（各A, PVA）はいずれも減高を示す。従って、本例は左室拡張末期圧および左房圧（肺静脈圧）の著しい上昇に伴う左房の後負荷不整合（afterload mismatch）の状態である。

正常化波形」(図3, 偽正常化)を区別するための重要な指標となる(正常波形ではPVAの増高がみられない)。

一方,後者の左室収縮機能に低下を認める例(虚血性心疾患, 拡張型心筋症)では,左室拡張末期圧の著明な上昇,さらには前負荷予備能の限界に伴う肺静脈圧(左房圧)の上昇をきたすため,左房収縮による左房から左室,および左房から肺静脈への血液流入(逆流)が減少し(TMfのAおよびPVFのPVAの減高),左房の後負荷不整合(afterload mismatch)の状態となる¹⁶⁾(図3, 拘束型)。このような病態では,肺血管床の器質的変化も考えられることから,前負荷の軽減(利尿薬・血管拡張薬)や心筋の収縮力増強(強心薬)につとめても,くりかえし肺うっ血をきたし,予後は不良と考えてよい。

2) 組織ドプラ法による検討

上記のTMfおよびPVF両波形は,いずれも前負荷の影響を受けることが知られている。近年,組織ドプラ法を用いれば比較的前負荷に影響されことなく左室拡張機能を評価できることが判明してきた。

前述のように,長軸および短軸方向の左室壁運動速波形を記録すれば(図1),左室の拡張に関

する以下のような所見が得られる³⁾。

洞調律時における拡張期波は,拡張早期波(Ew)と心房収縮期波(Aw)により構成される。正常若年者での両波高の比(Ew/Aw)は,僧帽弁口血流速波形の拡張早期波高(E)と心房収縮期波高(A)の比(E/A)と同様に1より大である。正常若年者における左室心筋の拡張は,拡張早期では短軸方向における輪状筋の弛緩が優位(短軸方向のEw > 長軸方向のEw),心房収縮期では長軸方向における斜走筋の伸展が優位(長軸方向のAw > 短軸方向のAw)である。

最近,短軸方向における左室壁運動速波形のEwのピーク速度およびII音大動脈弁成分からEwのピークまでの時間(IIA-Ew)が,左室コンプライアンス異常(TMfの偽正常化あるいは拘束型パターン)を含むすべての例において,左室圧下降脚の時定数(tau:弛緩異常)と各々有意な逆および正相関を示すことが判明し¹⁷⁾(図4),パルス組織ドプラ法による拡張早期指標が前負荷に影響されことなく左室の弛緩異常を正しく評価できることが明らかになった。

さらに,僧帽弁口および左室壁運動速波形の同時記録により,正常若年者では拡張早期における左室壁伸展の開始が左室内血液流入の開始に先行

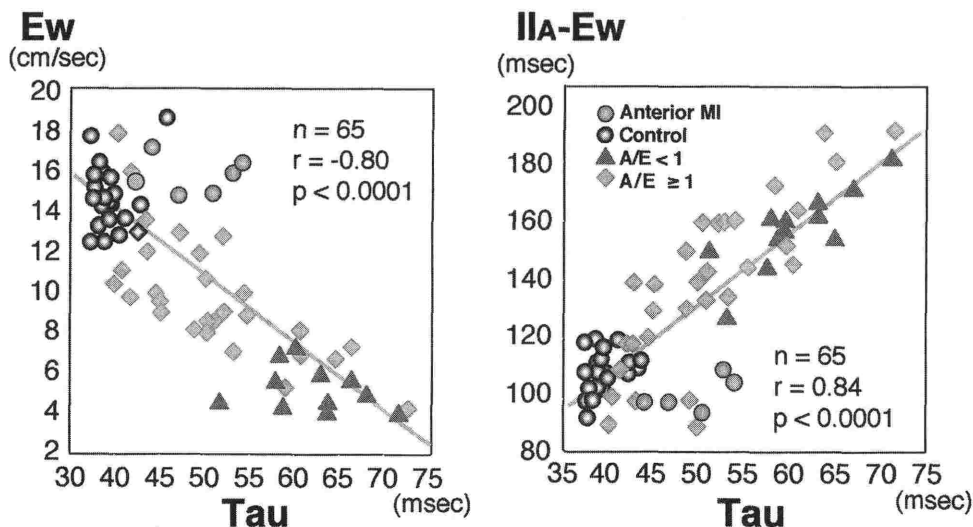


図4 パルス組織ドプラ法の拡張早期指標とTauの関係(文献¹⁷⁾より改変引用)
 左室後壁運動速波形の拡張早期波のピーク速度(左図, Ew)およびII音大動脈弁成分からEwのピークまでの時間(右図, IIA-Ew)は,左室圧下降脚の時定数(Tau)と各々有意な逆および正相関を示す。

する (active suction) のに比べ、僧帽弁口血流速波形が偽正常化パターンを示す例では左室内血液流入が左室壁伸展の開始に先行することが判明し (delayed relaxation)¹⁸⁾ (図5), 拡張早期における左室心筋の弛緩と左室内血液流入の関係を解明するうえで興味深い所見と思われる。

拡張早期波 (Ew) が左室心筋の能動的弛緩に対する重要な因子であるのに比べて、心房収縮期波 (Aw) は左房の収縮能 (左房圧あるいは肺静脈圧) と左室心筋の拡張末期コンプライアンス (左室拡張末期圧) により規定されている。

前述のように、正常例における心房収縮期の左室壁伸展 (Aw) は、短軸方向に比べて長軸方向が優位である³⁾ (図6, 正常高齢者)。一方、左室肥大例では左室拡張末期圧の上昇に伴い、長軸方向への壁伸展に限界をきたし、僧帽弁口血流速

波形の $E/A < 1$ を示す例では短軸方向の壁伸展の増大により左室内血液流入を代償する¹⁹⁾ (図6, 肥大)。しかしながら、左室拡大不全心では左房の拡大により心房収縮期の左室内血液流入を維持しようと努めるものの、僧帽弁口血流速波形の $E/A > 1$ を示す例 (コンプライアンス低下) では、短軸および長軸方向のいずれの壁伸展も低下をきたし (図6, 拡大), その結果、心房収縮期における左房→肺静脈への逆流、すなわち肺うっ血を招来するようになる。

以上の観点から、心尖部アプローチによる左室長軸断層図において、左室後壁中央部と僧帽弁後尖弁輪部における運動速波形を記録すると、後壁の Aw は左室拡張末期圧と、弁輪部の Aw は平均肺動脈楔入圧 (左房圧) と良好な相関を示すとの報告がある²⁰⁾ (図7)。従って、僧帽弁輪部にお

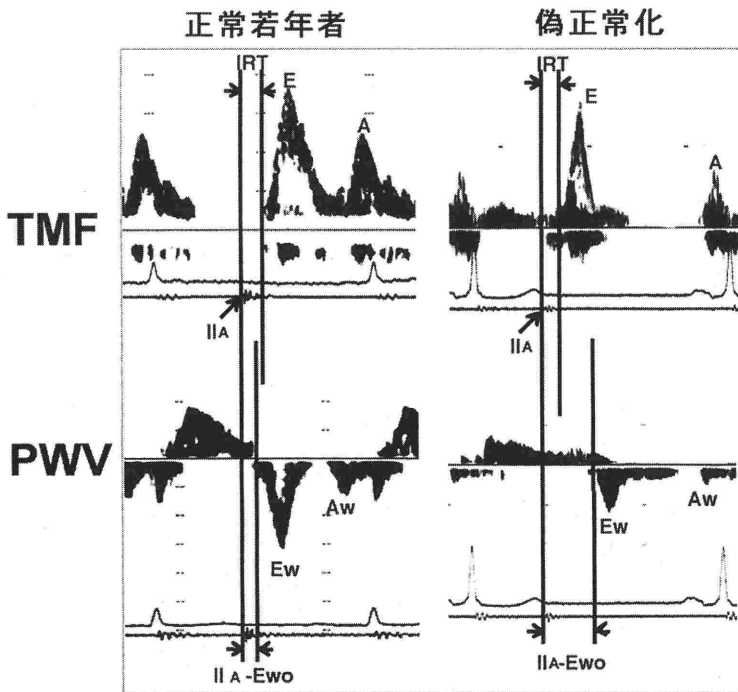


図5 僧帽弁口血流速波形の正常波形および偽正常化波形と左室後壁運動速波形の時間的關係 (パルス組織ドプラ法) (文献¹⁸⁾より改変引用)

正常若年者 (左図) では、拡張早期における左室壁伸展の開始 (Ewo) は左室内血液流入の開始に先行 ($II A-Ewo < IRT$) するが、僧帽弁口血流速波形 (TMF) が偽正常化パターンを示す例 (右図) では、左室内血液流入の開始が左室壁伸展の開始に先行 ($II A-Ewo > IRT$) する。IRT: 等容拡張時間, II A-Ewo: II 音大動脈弁成分から拡張早期における左室壁の伸展の開始までの時間, PWV: 左室後壁運動速波形, E: TMF の拡張早期波, A: TMF の心房収縮期波, Ew: PWV の拡張早期波, Aw: PWV の心房収縮期波。

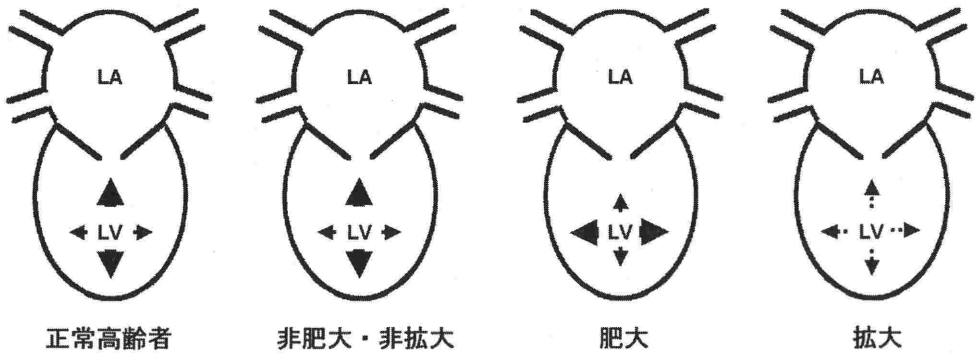


図6 正常および高血圧心における心房収縮期の左室壁拡張様相 (文献¹⁹)より改変引用)

僧帽弁口血流速波形の $E/A < 1$ (弛緩異常) を示す正常高齢者および高血圧心の非肥大・非拡大例では、左房 (LA) の収縮に伴う左室 (LV) 壁の伸展は、短軸に比べて長軸方向が優位である。一方、 $E/A < 1$ を示す高血圧心の肥大例では、長軸方向の左室壁伸展に限界をきたすため、短軸方向の伸展により左室内血液流入を代償するもの、 $E/A > 1$ を示す高血圧心の拡大不全例では短軸および長軸方向のいずれの左室壁伸展も低下をきたす。

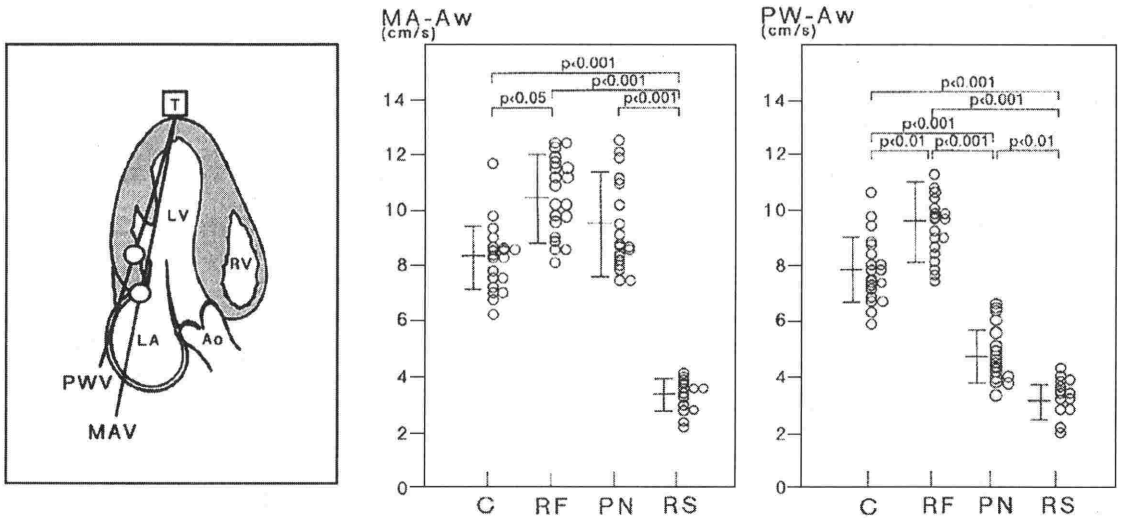


図7 各種病態における僧帽弁輪部および左室後壁運動速波形の心房収縮期波高の比較 (パルス組織ドブラ法) (文献²⁰)より改変引用)

心尖部アプローチによる左室長軸断層図を記録し、僧帽弁輪部 (MAV) および左室後壁中央部 (PWV) にサンプル部位を設定し、各々の部位における運動速波形を記録する (左図)。左房圧と左室拡張末期圧の両者が上昇している拘束型パターン ($E/A \geq 2$, RS) 例では、僧帽弁輪部 (MA-Aw) および左室後壁 (PW-Aw) のいずれの心房収縮期波高も減高する。一方、左室拡張末期圧の上昇に比べて左房圧が著明に上昇していない偽正常化パターン ($1 < E/A < 2$, PN) 例では、PW-Aw はRS例と同様に減高するものの、MA-Aw は減高を示さない。C: 正常若年者 ($E/A > 1$), RF: 弛緩異常パターン ($E/A < 1$) 例。

ける Aw は左室拡大不全心の予後、すなわち肺うっ血の重症度を規定する因子として重要であり、 $Aw < 4 \sim 5$ cm/sec の例では予後が不良であ

る^{21,22)}。

おわりに

パルス・ドプラ法の普及に伴い、肺静脈—左房—左室連関としての左心の血行動態異常を総合的に評価することが可能となってきた。また、新しく開発された組織ドプラ法は、血行動態に影響されない左室心筋特性を知る手段として臨床面で応用され始めている。これらの方法は、非観血的アプローチである利点から考えても、将来、臨床的に貢献できる重要な検査法となりうることが期待される。

文 献

- 1) Oki T : State of the art: "Diastology" research 1998. *J Med Invest* 45 : 9-25, 1998
- 2) 大木 崇, 森 一博, 若槻哲三ら : 心エコー・ドプラ法の臨床 (第2版) (大木 崇編). 医学書院, 東京, 2001, PP5~10
- 3) Oki T, Tabata A, Mishiro Y, et al : Pulsed tissue Doppler imaging of left ventricular systolic and diastolic wall motion velocities to evaluate differences between long and short axes in healthy subjects. *J Am Soc Echocardiogr* 12 : 308-313, 1999
- 4) Oki T, Iuchi A, Tabata T, et al : Left ventricular systolic wall motion velocities along the long and short axes measured by pulsed tissue Doppler imaging in patients with atrial fibrillation. *J Am Soc Echocardiogr* 12 : 121-128, 1999
- 5) Onose Y, Oki T, Mishiro Y, et al : Influence of aging on systolic left ventricular wall motion velocities along the long and short axes in clinically normal patients determined by pulsed tissue Doppler imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 12 : 921-926, 1999
- 6) Matsuo M, Oki T, Mishiro Y, et al : Early systolic mitral annular motion velocities responses to dobutamine infusion predict myocardial viability in patients with previous myocardial infarction. *Am Heart J* (in press)
- 7) Kitabatake A, Inoue M, Asao M, et al : Transmitral blood flow reflecting diastolic behaviour of the left ventricle in health and disease: a study by pulsed Doppler technique. *Jpn Circ J* 46 : 92-102, 1982
- 8) Ohkushi H, Asai M, Ishimoto T, et al : Left ventricular diastolic filling patterns in hypertrophic cardiomyopathy and myocardial infarction: studies by pulsed Doppler echocardiography and multigated blood pool scan. *J Cardiol* 14 : 95-104, 1984
- 9) Appleton CP, Hatle LK, Popp RL : Relation of transmitral flow velocity patterns to left ventricular diastolic function: new insights from a combined hemodynamic and Doppler echocardiographic study. *J Am Coll Cardiol* 12 : 426-440, 1988
- 10) Dougherty AH, Naccarelli GV, Gray EL, et al : Congestive heart failure with normal systolic function. *Am J Cardiol* 54 : 778-782, 1984
- 11) Soufer R, Wohlgeleitner D, Vita N, et al : Intact systolic left ventricular function in clinical congestive heart failure. *Am J Cardiol* 55 : 1032-1036, 1985
- 12) Rihal CS, Nishimura RA, Hatle LK, et al : Systolic and diastolic dysfunction in patients with clinical diagnosis of dilated cardiomyopathy: relation to symptoms and prognosis. *Circulation* 90 : 2772-2779, 1994
- 13) Xie GY, Berk MR, Smith MD, et al : Prognostic value of Doppler transmitral flow patterns in patients with congestive heart failure. *J Am Coll Cardiol* 24 : 132-139, 1994
- 14) Oki T, Fukuda N, Iuchi A, et al : Transesophageal pulsed Doppler echocardiographic evaluation of left atrial systolic performance in hypertrophic cardiomyopathy: combined analysis of transmitral and pulmonary venous flow velocities. *Clin Cardiol* 20 : 47-54, 1997
- 15) Oki T, Fukuda N, Iuchi A, et al : Changes in left ventricular inflow and pulmonary venous flow velocities during preload alteration in hypertrophic cardiomyopathy. *Am J Cardiol* 77 : 430-435, 1996
- 16) Oki T, Fukuda N, Iuchi A, et al : Left atrial systolic performance in the presence of elevated left ventricular end-diastolic pressure: evaluation by transesophageal pulsed Doppler echocardiography of left ventricular inflow and pulmonary venous flow velocities. *Echocardiography* 14 : 23-32, 1997
- 17) Oki T, Tabata T, Yamada H, et al : Clinical application of pulsed Doppler tissue imaging for assessing abnormal left ventricular relaxation. *Am J Cardiol* 79 : 921-928, 1997
- 18) Onose Y, Oki T, Tabata T, et al : Assessment of the temporal relationship between left ventricular relaxation and filling during early diastole using pulsed Doppler echocardiography and tissue Doppler imaging. *Jpn Circ J* 63 : 209-215, 1999
- 19) Yamada H, Oki T, Tanaka H, et al : The role of short and long axes function for determining late diastolic left ventricular filling in patients with hypertension. *Circulation* (in press)
- 20) Abe M, Oki T, Tabata T, et al : Evaluation of the hemodynamic relationship between the left atrium and left ventricle during atrial systole by pulsed tissue Doppler imaging in patients with left heart failure. *Jpn Circ J* 63 : 763-769, 1999
- 21) Sohn DW, Kim YJ, Lee MM, et al : Differentiation between reversible and irreversible restrictive left ventricular filling patterns with the use of mitral annulus velocity. *J Am Soc Echocardiogr* 13 : 891-895, 2000
- 22) Yamamoto T, Oki T, Yamada H, et al : Prognostic value of atrial systolic mitral annulus motion velocity in patients with dilated failing heart. *J Am Soc Echocardiogr* 14 (abstr) : 428, 2001