トピックス

II. 診断の進歩

3. 心臓超音波検査

山田 博胤¹⁾ 大木 崇²⁾

要 旨

慢性心不全の診断，治療効果の判定，および経過観察に心臓超音波検査は欠かすことのできない手段である。臨床症状から心不全を疑った場合，まず左室駆出率 (ejection fraction : EF) を評価し，EFの低下を認める場合にはドプラ法により拡張機能を評価し，心不全の診断および重症度評価を行う。一方，EFが保たれている場合には，各種器質的心疾患を除外した上で拡張機能を評価し，“EFが保持された心不全”として診断される。

〔日内会誌 101 : 354~361, 2012〕

Key words 左室駆出率，拡張機能，ドプラ法

はじめに

あらゆる心疾患の終末像ともいえる心不全は，生命予後が不良であるため臨床的にきわめて重要な病態であり，的確かつ迅速な診断が求められる。心不全を疑った場合，その診断および心機能の重症度を評価するため，心臓超音波検査を速やかに施行する必要がある。本法は，迅速，非侵襲的，かつ安全な検査手段として広く普及しており，心臓の解剖学的情報（形態，容積および重量），壁運動，弁機能，血行動態などの情報を最も簡便に得ることができる。従って，現在，本検査法は日常診療における心不全の診断，治療効果の判定，および経過観察に欠かすことのできないツールとなっている。心臓超音波検

査では，Mモードおよび断層心エコー法，パルスおよび連続波ドプラ法，組織ドプラ法，スペックル・トラッキング法，そして三次元法およびその解析法が用いられる。

近年，心エコー・ドプラ法による左心不全の診断および重症度評価に関しては，左室駆出率 (ejection fraction : EF) が維持されているか否かの判定がまず行われる。EFが低下している場合（通常，EFが40~50%未満とされる）には，僧帽弁口 (transmitral flow velocity : TMF) および肺静脈 (pulmonary venous flow velocity : PVF) 血流速波形から計測した各指標を用いてその重症度を評価する。一方，EFが保持されている場合には，TMFと僧帽弁輪運動速波形 (mitral annular motion velocity : MAM) の両拡張早期波高の比 (E/e') が左室充満圧の指標として用

1) 徳島大学病院循環器内科，2) 独立行政法人国立病院機構東徳島医療センター

Chronic heart failure : Progress in Diagnosis and Treatment. Topics : II. Progress in diagnosis ; 3. Echocardiography.

Hirotsugu Yamada¹⁾ and Takashi Oki²⁾ : ¹⁾Department of Cardiovascular Medicine, Tokushima University Hospital, Japan and ²⁾Higashi Tokushima Medical Center, National Hospital Organization, Japan.

図 1. 心エコー・ドプラ法を用いた左室充満圧の推定 (米国心エコー図学会¹⁾)

E/A：僧帽弁口血流速度波形の拡張早期 (E) 波高と心房収縮期 (A) 波高の比, DT：E波のピークからの減速時間, LAP：左房圧, e'：僧帽弁輪運動速度波形の拡張早期波高, Vp：Mモードカラードプラ法により計測される左室流入血流伝播速度, S/D：肺静脈血流速度波形の収縮期 (S) 波高と拡張期 (D) 波高の比, Ard-Ad：肺静脈および僧帽弁口血流速度波形の両心房収縮期波持続時間の差, Val ΔE/A：バルサルバ負荷によるE/Aの変化分, PAS：推定収縮期肺動脈圧, IVRT：等容弛緩時間, TE-e'：E波とe'波の開始時間の差, Sep：中隔側, Lat：側壁側, LAVI：左房容積係数

いられ、その指標のみで判定できない場合には他の多くの心エコー・ドプラ指標を併用することにより総合的に診断する (図1)¹⁾。

右心不全に対する心エコー・ドプラ法の診断に関しては、左心不全のように系統的な評価法が確立されておらず、右房・右室の形態異常、肺高血圧合併の有無と程度、下大静脈の形態観察などによって総合的に診断されるのが現状である。

心臓超音波検査の有利な点は、心不全をきたす基礎疾患の検索と、心不全の有無や重症度の評価が同一の検査手段で行えることにある。慢性心不全の診断において、その基礎疾患を特定することは治療戦略の選択に際して最も必要な情報の一つである。心不全の原因となる器質的心疾患のうち、本検査のみで診断可能な疾患も少なくない。このような心臓超音波検査の利点の中でも、本稿では左室収縮機能および拡張機能の評価に焦点を当て、最近のトピックスを交えながら、本検査法の臨床的役割について述べ

てみたい。

1. 左室収縮機能の評価

左室収縮機能はEFで評価されることが多く、日常臨床においても本指標を基準として、「左室駆出率が低下した心不全heart failure with reduced ejection fraction：HFREF」と「左室駆出率が保持された心不全heart failure with preserved ejection fraction：HFPEF」に大別される。EFが左室収縮機能の評価に対して最も実用的な指標であることに異論はないが、従来の報告ではどの値を基準にして正常あるいは異常と判定するかは明確でない。EFが保たれている症例をエントリーした多くの大規模臨床試験では、EF≤40%を収縮不全例として除外し、収縮不全心を対象とした試験では収縮機能低下の基準としてEF≤35%が用いられていることが多い。また、心臓再同期療法の適応基準はEF≤30～35%であり、一般的にはEF≤30～40%であれば明ら

トピックス

かに収縮機能が低下していると判断される。米国心エコー図学会の基準ではEF $\geq$ 55%を正常としているが、一方ではHFPEFの診断基準ではEF $\geq$ 50%が広く用いられており、EF=50~55%をどう判断するかについてはいまだにgray zoneであるのが現状である。

また、最近の組織ドプラ法およびスペックル・トラッキング法による解析から、EFが保持されているだけで左室収縮機能が正常であると判断することは危険であることが判明している。すなわち、EFは左室ポンプ機能の指標であり、左室心筋の収縮能(contractility)を必ずしも反映しないからである。EFは、左室容積、心拍数、血圧、前負荷、後負荷、弁機能など様々な因子の影響を受ける²⁾。特に中等度以上の僧帽弁および大動脈弁逆流を認める場合、そして高血圧性心疾患や肥大型心筋症などで左室壁肥厚を有する場合には、EFにより左室収縮機能を過大評価することがあるので注意が必要である。逆に、脱水や血液透析直後、頻脈などでは、前負荷減少のために、EFを用いた評価では左室収縮機能を過小評価する場合がある。

1) 左室サイズによる評価

最も簡便な収縮機能の評価法は、Mモードあるいは断層心エコー法を用いて、左室拡張末期径(容積)および左室収縮末期径(容積)を計測することである。左室拡大は、収縮機能低下に対するFrank-Starling機序による代償機転として生じることから、著明な左室拡大は経過の長い心不全、あるいは慢性心不全の急性増悪であることが多い。

2) 左室容積から求められる指標

Mモードあるいは断層心エコー法、最近では三次元心エコー法で計測した左室容積を用いて、

1 回拍出量(stroke volume: SV)=拡張末期容積(end-diastolic volume: EDV)-収縮末期容積(end-systolic volume: ESV)

左室駆出率(EF)=SV/EDV $\times$ 100(%)

心拍出量=SV $\times$ 心拍数

の各指標を求めることができる。

Mモード法を用いた評価は簡便であるが、局所壁運動異常を有する場合、著明な左室拡大あるいは肥大を伴う場合には適用できないため、断層心エコー法により四腔および二腔断面の2断面を用いて、modified Simpson法あるいはarea-length法により容積を算出する。一方、正確な計測値を得るためには、計測が可能である画質の保たれた超音波画像を必要とすること、また真の心尖部を描出しえた心尖部断面であることなど条件も多い。近年登場した三次元心エコー法は、Mモードあるいは断層心エコー法での算出上の仮説がないため、左室容積を最も正確に計測できるという点ではメリットが大きい³⁾。しかしながら、現状ではすべての超音波診断装置が三次元心エコー法に対応する状況には至っておらず、今後の普及が待たれる。とはいうものの、臨床現場においては一桁までの正確なEFの評価が求められることはなく、大雑把な見た目のEF(visual EFやeye-ball EFと呼ばれる)で評価されることのほうが多い。

3) ドプラ法による1回拍出量の推定

パルス・ドプラ法を用いて記録した左室流出路血流速波形の時間速度積分値と、断層心エコー法の傍胸骨アプローチにより計測した左室流出路から求めた左室流出路断面積の積が1回拍出量である。しかし、血流速波形を記録する際のドプラ角度の問題、流出路から断面積を推定することの誤差などにより、正確な測定は容易でない。また、収縮機能が障害されてもFrank-Starling機序に基づく代償機転が働くため、1回拍出量は必ずしも収縮機能を反映する指標であるとは限らない。

4) 僧帽弁逆流血流速波形による左室dP/dtの推定

連続波ドプラ法を用いて僧帽弁逆流血流速波形のプロファイルが明瞭に記録できれば、収縮

心臓再同期療法前

心臓再同期療法後

図2. 心臓再同期療法 (cardiac resynchronization therapy : CRT) 前後のスペックル・トラッキング解析

62歳女性，拡張型心筋症。CRT施行前後における左室各分画の時間-ストレイン曲線および最大収縮期ストレイン (peak systolic strain) のブルズ・アイ表示である。CRT施行後 (右図) は施行前 (左図) に比べて，左室各分画の収縮がより同調していることが理解できる。

早期の $\Delta P/\Delta t$ から，左室peak dP/dtの推定が可能である。本指標は，負荷の影響を受けるものの，左室収縮性を比較的良好に反映する指標として用いられている。

5) 組織ドプラ法を用いた指標

パルス組織ドプラ法を用いることにより，左室壁あるいは僧帽弁輪運動速波形の時間変化を記録することができ，その収縮期波は，通常2つの成分により構成される。収縮早期にみられる収縮期第1波は，若年者の長軸方向の記録で著しく増高し，加齢により次第に減高する⁴⁾。この収縮期第1波高と駆出期の収縮期第2波高は，左室peak dP/dtと良好な相関を示すが⁵⁾，前指標のほうがより感度が高い。EFは記録断面や検査者間による計測誤差が比較的大であるが，組織ドプラ法で記録される収縮期波高は再現性がよく，EFで検出できないわずかな心筋収縮能の低下を早期に検出できる。

6) スペックル・トラッキング法を用いた指標

スペックル・トラッキング法は，断層心エコー図上のエコー反射点をコンピューターが自動的に追跡する技術であり，左室断層図のシネメモリから，局所心筋の長軸，重心，および円周方

向のストレインあるいはストレインレートを角度非依存性に計測することができる⁶⁾。結果として，局所壁運動異常を示す例においても左室局所機能が評価できるのみならず，その総和としての左室全体の機能をも評価できるようになった。ある断面における左室壁各分画の収縮期ストレインの総和をグローバル・ストレインと呼び，左室全体の収縮機能を反映する指標として期待されている。

また，本法を用いて局所における各方向の心筋ストレインを得ることも可能となった。近年，日常臨床において心臓再同期療法が応用され始めたことにより，左室局所における心筋収縮における同期性の評価が求められている。当初は組織ドプラ法が用いられていたが満足できる成績が得られず，最近では本法を用いた心筋同期性の評価が試みられる傾向にある (図2)。

2. 左室拡張機能の評価⁷⁾

左心不全が左室収縮機能の低下とほぼ同義語として理解されていたのは過去の知識となり，現在において心不全の診断，重症度や予後を議

トピックス

図3. 心エコー・ドプラ法を用いた左室拡張機能不全の重症度分類

HFREF：左室駆出率が低下した心不全，HFPEF：左室駆出率が維持された心不全，E：拡張早期僧帽弁口血流速度波，A：心房収縮期僧帽弁口血流速度波，PVS：収縮期肺静脈血流速度波，PVD：拡張期肺静脈血流速度波，PVA：心房収縮期肺静脈血流速度波，S'：収縮期僧帽弁輪運動速度波，e'：拡張早期僧帽弁輪運動速度波，a'：心房収縮期僧帽弁輪運動速度波

論する際には、常に左室拡張機能を考慮することが求められている。その最も大きな要因として、近年の非観血的検査法、とりわけ心エコー・ドプラ法によって以下の諸点が明らかになったためである⁸⁾。

①経胸壁アプローチによりTMFおよびPVF、さらにはMAMが容易に記録できるようになった。

②通常、EFの低下に先行して拡張機能異常が出現する。

③左心不全の30～50%では、EFが保持されていることが近年の疫学研究から明らかになった。

④左室収縮機能の低下例では、左室拡張機能が予後を決定する。

⑤心不全患者の運動耐容能は、EFよりも左室拡張機能に規定される。

1) TMFを用いた左室拡張機能不全の重症度評価

洞調律例において拡張期の血流動態を最も簡単に評価できる指標はTMFである。本波形は、拡張早期(E)波と心房収縮期(A)波により構成されるが、左室拡張機能異常の程度を反映する所見として以下の3つのパターンに分類できる(図3)。

(1) 弛緩異常パターン

弛緩異常を反映してE波の減高とピークからの減速時間(DT)の延長がみられ、拡張早期における左室充満の障害を代償するため左房収縮の亢進によりA波が増高するパターンである。その結果、E/Aが低下する($E/A < 1$)が、この血流速度パターンは最も早期の左室拡張機能異常を示し、健常高齢者、高血圧例などでよく観察され

図 4. 心エコー・ドプラ法を用いた左室拡張機能不全の重症度分類（米国心エコー図学会¹⁾）

e'：僧帽弁輪運動速波形の拡張早期波高，Septal：中隔側，Lateral：側壁側，LAVI：左房容積係数，E/A：僧帽弁口血流速波形の拡張早期（E）波高と心房収縮期（A）波高の比（E/A），DT：E波のピークからの減速時間，Ard-Ad：肺静脈および僧帽弁口血流速波形の両心房収縮期波持続時間の差，Val ΔE/A：バルサルバ負荷によるE/A比の変化分。

る。通常，この段階では左室拡張末期圧の有意な上昇を認めず，左室拡張機能異常の程度としては軽症である。

（2）偽正常化パターン

弛緩異常パターンと後述する拘束型パターンの中間に位置する病態で，E/A（ $1 \leq E/A < 2$ ）およびE波のDTが正常値を示す。弛緩異常パターンを呈する例と比較し，左室拡張末期圧，さらには左室充満圧が上昇している状態で，通常，臨床的に心不全と診断される。正常パターンとの鑑別には，PVF，MAMなどから得られる指標が用いられる。例えば，TMFのE波高とMAMの拡張早期波高（e'）の比（E/e'） > 15 ，あるいはE/e' = 8～15で，かつPVFとTMFの両心房収縮期波の持続時間の差（Ard-Ad） ≥ 30 msecの所見があれば，左室拡張末期圧の上昇，すなわち

偽正常化パターンと判定できる。

（3）拘束型パターン

左室コンプライアンスの低下，容量負荷，僧帽弁逆流などにより左室充満圧が高度に上昇した例では，TMFのE波が著明に増高して尖鋭化し，そのDTが短縮する。一方で，著明に上昇した左室拡張末期圧が左房収縮に対する後負荷増大となるためA波は減高し，その結果，E/Aが著明に増大する（E/A ≥ 2 ）。左室充満圧の著明な上昇を示唆するこの拘束型パターンを呈する例は，左室拡張機能不全の重症例である。

2) 米国心エコー図学会による左室拡張機能不全の重症度分類¹⁾

日常臨床では上記のTMFを用いた分類が便利であるが，正常パターンと偽正常化パターンの区別が困難な例にしばしば遭遇することから，

トピックス

図5. HFPEF診断のフローチャート（欧州心臓病学会⁹⁾）

LVEDVI：左室拡張末期容積係数，mPCW：平均肺動脈楔入圧，LVEDP：左室拡張末期圧， τ ：左室圧曲線下行脚の時定数，b：左室chamber stiffness定数，TD：組織ドプラ法，DT：E波のピークからの減速時間，Ard-Ad：肺静脈および僧帽弁口血流速波形の両心房収縮期波持続時間の差，LAVI：左房容積係数，LVMI：左室心筋重量係数，BNP：脳性ナトリウム利尿ペプチド

米国心エコー図学会では図4に示すようなフローチャートを用いるよう推奨している。この重症度分類では，TMFを評価する前段階で，MAMの拡張早期波高（ e' ）と左房容積係数（LAVI）の評価が加えられている。

3) 連続波ドプラ法による肺動脈収縮期圧の評価

連続波ドプラ法を用いて三尖弁逆流血流速波形を記録し，その最大速度を v とすると，簡易ベルヌーイの式から，右室-右房間圧較差（PG）は $PG = 4v^2$ として算出できる。この数値に下大静脈の情報から推測した右房圧を加えることで右

室収縮期圧が推定できる。肺動脈狭窄がなければ，この右室収縮期圧は肺動脈収縮期圧とほぼ等しく，肺高血圧の有無および程度の評価が可能となる。

収縮不全心，拡張不全心にかかわらず，左室充満圧の上昇の結果として生じる肺高血圧の合併は，心不全の診断や治療効果の判定に際して重要な評価項目である。2009年に米国心エコー図学会が提唱した左室拡張機能評価に関するガイドラインにおいても，左房圧推定の評価項目に肺動脈収縮期圧が含まれている¹⁾。TMFを用いた左房圧の評価が洞調律例に限定されるのに対

して、本指標は心房細動や弁置換術後例などでも評価できる利点を有するが、左心不全以外の肺動脈性肺高血圧症を呈する疾患でも上昇するので注意を要する。

4) 心臓超音波検査によるHFPEFの診断

欧州心臓病学会の推奨(図5)⁹⁾や日本循環器学会のガイドライン(後述)の診断アルゴリズムの中に心臓超音波検査による指標が組み込まれていることを考慮しても、HFPEFの診断に関しては心臓超音波検査が主役であるといっても過言ではない。通常、次の3条件を満たす場合にHFPEFと診断される。

①慢性心不全の症状や症候の存在

②EF $\geq$ 40~50%

③左室拡張機能異常の存在(左室弛緩異常, 左室コンプライアンスの低下)

5) 慢性心不全治療のガイドライン

慢性心不全治療に関するガイドラインが2010年度末に改訂され¹⁰⁾, 心不全の診断にフローチャートが導入された。HFREFにおいてはその治療効果判定, 心不全重症度, 予後規定因子の評価に心臓超音波検査が推奨されている。一方, HFPEFを疑った場合には, 先天性心疾患, 弁膜疾患, 心膜疾患, 肺動脈性肺高血圧症などを除外し, 心臓超音波検査の諸指標から心不全であることを確認する手順になっている。この診断アプローチはかなり煩雑ではあるものの, これまでより正確な心不全診断が可能になるものと考えられる。

まとめ

慢性心不全の診断において心臓超音波検査の果たす役割は大である。一方, 心不全の中でもHFPEFの診断に関しては, 従来の断層心エコー法およびドプラ法に加えて, 組織ドプラ法を用いた指標(E/e')が広く普及しつつあるが, 一方

では様々な問題点も議論されている。また, EF以外の収縮期指標で検討した場合, HFPEFにおいてさえも左室心筋の収縮能は低下しているという報告が少なくない。このような種々の問題を解決するため, そして心不全の病態をさらに解明していくために, 今後も心臓超音波検査の多方面からのアプローチが活用されることを期待する。

著者のCOI(conflicts of interest)開示: 山田博胤: 研究費・助成金(文部科学省)

文 献

- 1) Nagueh SF, et al: Recommendations for the evaluation of left ventricular diastolic function by echocardiography. J Am Soc Echocardiogr 22: 107-133, 2009.
- 2) Konstam MA: "Systolic and diastolic dysfunction" in heart failure? Time for a new paradigm. J Cardiac Fail 9: 1-3, 2003.
- 3) Mor-Avi V, et al: Real-time 3-dimensional echocardiography: an integral component of the routine echocardiographic examination in adult patients? Circulation 119: 314-329, 2009.
- 4) Onose 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.
- 5) Yamada H, et al: Assessment of left ventricular systolic wall motion velocity with pulsed tissue Doppler imaging: comparison with peak dP/dt of the left ventricular pressure curve. J Am Soc Echocardiogr 11: 442-449, 1998.
- 6) Leitman M, et al: Two-dimensional strain-a novel software for real-time quantitative echocardiographic assessment of myocardial function. J Am Soc Echocardiogr 17: 1021-1029, 2004.
- 7) 大木 崇, 他: 左室機能不全は血流と壁運動の不整合(mismatch)である. J Cardiol Jpn Ed 2: 88-111, 2008.
- 8) 大木 崇, 水口幸生: 左室拡張機能とは, 拡張期学~Diastologyのすべて~. 大木 崇, 竹中 克編. 文光堂, 東京, 2010, 2-9.
- 9) Paulus WJ, et al: How to diagnose diastolic heart failure: a consensus statement on the diagnosis of heart failure with normal left ventricular ejection fraction by the heart failure and echocardiography associations of the European Society of Cardiology. Eur Heart J 28: 2539-2550, 2007.
- 10) 松崎益徳: 循環器病の診断と治療に関するガイドライン(2009年度合同研究班報告), 慢性心不全治療ガイドライン(2010年改訂版). 2010.