

質疑応答

(質問) ベッドサイドで評価できる、また、カテーテル室で評価できる、
いわゆる心機能の指標についてご教示下さい。

(神奈川県：E・H)

(回答) 穴戸稔聡*, 砂川賢二*

心臓の主要な機能は血液を拍出する、いわゆる心ポンプ機能で、その基本は収縮能と拡張能にある。この収縮能と拡張能を理解するために、まず心室の圧-容積関係について解説する。

圧-容積関係 (Pressure-Volume Relation) とは

図1 Aに示すように、縦軸に左室圧、横軸に左室容積をとり、一心周期にわたりプロットすると反時計回りに回転する長方形型の軌跡が描かれ

る。右下の点 (a点) は左室充満終了点で拡張期末に相当する。ここから等容収縮により左室圧の上昇がおこり (等容収縮期)、右上の点 (b点) で大動脈弁が開放し、左上の点 (c点, 収縮期末) まで駆出を行う (駆出期)。ここまでの二つのプロセスがいわゆる収縮期に相当する。その後、等容弛緩により圧は減少する (等容弛緩期)。左下の点 (d点) で僧帽弁が開放し充満が始まり (充満期)、a点に戻ってくる。この二つが拡張期に相当する。

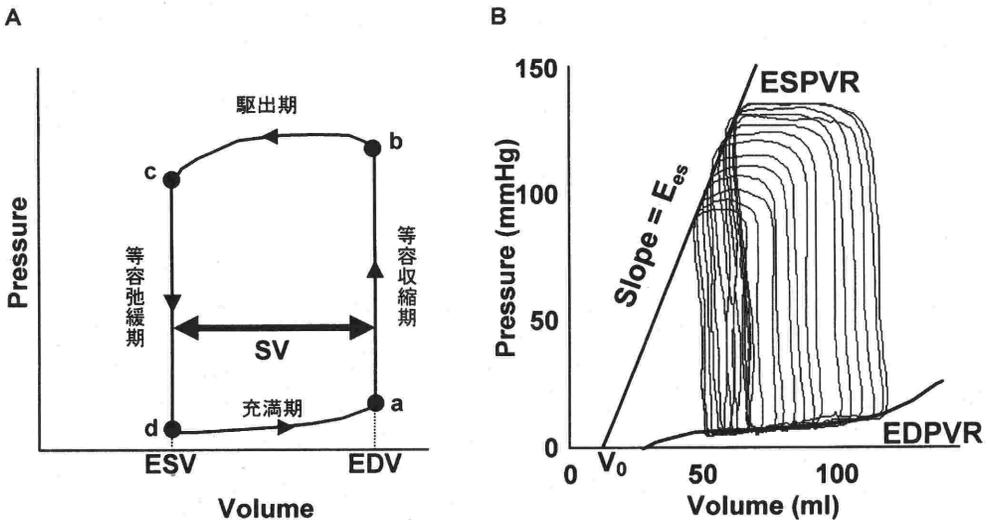


図1 左室圧-容積関係

A：一心周期における左室圧-容積のループ、B：下大静脈閉塞中の左室圧-容積関係
ESV：収縮期末容積、EDV：拡張期末容積、SV：一回拍出量、ESPVR：収縮期末圧-容積関係、
EDPVR：拡張期末圧-容積関係、Ees：収縮期末エラストランス

*国立循環器病センター研究所循環動態機能部

前負荷あるいは後負荷を変化させ複数のループを描かせると、図1Bのように各ループの左肩の点はほぼ直線を形成する。この直線を収縮期末圧-容積関係 (end-systolic pressure-volume relation, ESPVR) と呼び、この傾きを E_{es} あるいは E_{max} 、この直線の容積軸切片を V_0 と呼ぶ。収縮性が高まると ESPVR は急峻に (E_{es} が大きく) なり、収縮性が低くなると緩やかに (E_{es} が小さく) なる (図2A)。 E_{es} は負荷依存性が少なく最も優れた収縮性の指標と考えられている¹⁾。しかしながら、臨床においてはカテーテル検査室で、カテ先血圧計とコンダクタンスカテーテルを用いて、下大静脈などの閉塞により前負荷を変化させ求めなければならないという煩雑さがあり、あまり普及していない。

そこで最近、任意の一心拍の E_{es} を推定する方法がいくつか報告されている²⁻⁵⁾。Senzaki ら²⁾ や Shishido ら³⁾ の方法は、侵襲的に測定された一心拍の左室圧や左室容積を用いて、精度良く E_{es} を推定している。また、Hayashi らは、左室圧とその時間経過のみから心室-動脈整合 (ventricular-arterial coupling) を精度良く推定する方法を報告している⁴⁾。この方法では、さらに一回拍出量 (stroke volume, SV) を計測すれば E_{es} も知ることができる。Chen らは上腕動脈カフ圧と心エコー及びドプラ法による左室駆出率と SV から E_{es} を非侵襲的に推定する方法を報告した⁵⁾。今

後のこれらの方法の発展が望まれるところである。

次に拡張期に注目してみると、負荷を変化させた時の拡張期末圧-容積関係 (end-diastolic pressure-volume relation, EDPVR, 図1B) は、心室のコンプライアンスが低下した (=心室が硬くなった) とき、左上方に変位するため (図2B)、EDPVR を評価することで拡張特性、特に伸展性の評価に用いることが可能である^{1,6)}。具体的には EDPVR を指数関数などで近似するなどして評価する。また、弛緩が完全に終了していれば、拡張中期から末期にかけての心室圧は、ほぼ EDPVR に沿って変化するところから、一心拍の充満期の圧-容積関係を同様に指数関数などで近似して、その傾きで評価することも可能である。しかしながら、EDPVR 自体、心膜の影響や対側の心室の充満、冠灌流圧、心筋の粘性など影響を受けるので、その評価には十分な注意を要する^{6,7)}。

心室の圧-容積関係 (ESPVR や EDPVR) を検討することにより、収縮能、拡張能や、さらに心室のエネルギー学的評価も行うことが可能であるが、先にも述べたように煩雑であるため、臨床の間ではこれに変わる種々の指標が用いられることが多い。以下にそれらの代表例を列挙し、その限界について述べる。

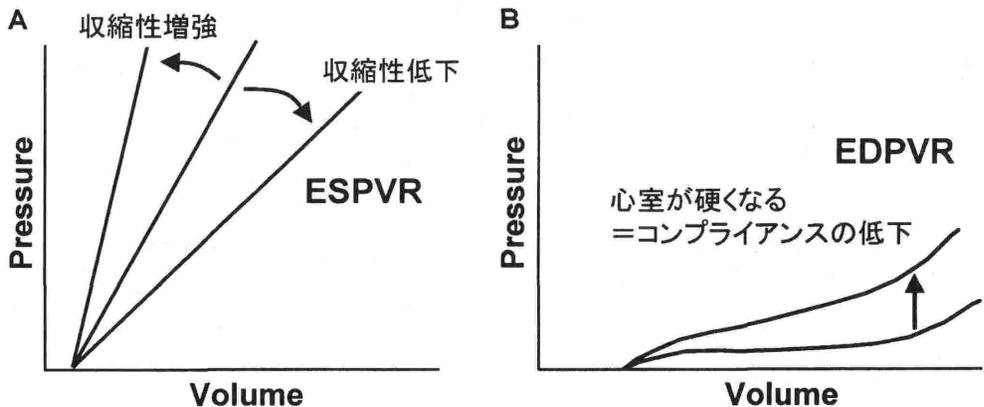


図2 収縮期末圧-容積関係(A)と拡張期末圧-容積関係(B)の模式図
ESPVR: 収縮期末圧-容積関係, EDPVR: 拡張期末圧-容積関係

等容収縮期の指標

1) peak dP/dt

心室内にカテ先血圧計を挿入するのみで収縮能を評価できる簡便な方法である。また、房室弁逆流ドプラ波形から、簡易ベルヌーイの式を用いて経時的な左房-左室圧較差を求めその微分値からこれを推定する方法や、流速が1 m/s (4 mmHg) から3 m/s (36 mmHg) になるまでの時間から平均的なdP/dtを求めこれを代用として用いる方法など、ベッドサイドでも簡便に測定することができる⁸⁾。

この指標は、前負荷あるいは後負荷の増大に伴い上昇し、心拍数の増加でも上昇する。しかしながら、これらの条件が大きく変化する事がなければ、極めて簡便に収縮能を評価できる指標といえる。

駆出期の指標

1) 心拍出量 (cardiac output, CO), 一回拍出量 (stroke volume, SV)

$$SV = EDV - ESV, CO = SV \times HR$$

(EDV: 拡張末期容積, ESV: 収縮末期容積, HR: 心拍数)

ベッドサイドにおいては、Mモードまたは断層心エコー図や、大動脈駆出血流ドプラ波形から求めることができる。また、観血的にSwan-Ganzカテーテルを挿入し熱希釈法によりCOを測定する方法もある。カテ室においては、左室造影により左室容積を求める。

これらの指標は、収縮能も反映するが前負荷の増大で増加、後負荷の増大で減少、また、SVは心拍数の上昇で減少する。これらの影響を無視できるものと仮定すると、前負荷との関係を見ることにより、Frank-Starlingの心機能曲線を描くことができ、実際にForrester分類⁹⁾として、ICUやCCU等では欠かせない指標となっている。

2) 駆出率 (ejection fraction, EF), 内径短縮率 (fractional shortening, FS)

$$EF = SV / EDV, FS = (Dd - Ds) / Dd$$

(Dd: 拡張末期径, Ds: 収縮末期径)

EFは左室容積から容易に計算することができる、左室のポンプ機能を表す良い指標とされている。

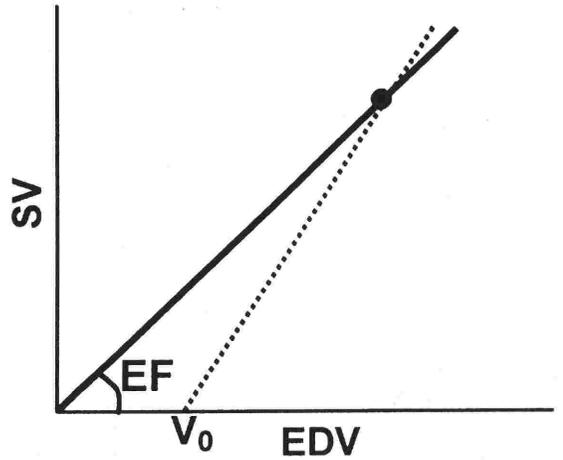


図3 駆出率の概念図

実線の傾きが駆出率 (EF), 点線が Frank-Starling の心機能曲線を示している。

る。また、EDV-SV 関係から EF を考えてみると、Frank-Starling 心機能曲線の傾きの推定値であることが理解される (図3)。FS は EF の簡便な代用として用いられ、心エコー図上の左室腱索レベルで Dd と Ds を計測するのみで求められる。最近、熱希釈法で右室駆出率の測定できるカテーテルが市販されており、右室心筋梗塞症や肺高血圧症などでは有用であろう。

これらの指標は、収縮能を反映し前負荷への依存は比較的少ないが、後負荷の増大で減少する。

等容弛緩期の指標

1) peak -dP/dt, 等容弛緩時間 (isovolumic relaxation time, IRT)

左室圧データから求められる peak -dP/dt (peak dP/dt と同様に peak -dP/dt もドプラ法で房室弁逆流から推定することも可能である) や、僧帽弁口流入血流ドプラと心音図の同時記録により求められる IRT は、従来より弛緩能の評価に用いられてきた。例えば peak -dP/dt の低下、IRT の延長は左室弛緩の障害を意味すると考えられてきた。しかし、これらの指標は左室収縮期圧や左房圧などの他因子の影響も大きいため注意を要する。

2) 時定数 (τ)

$$P(t) = (P_0 - P_\infty)e^{-t/\tau} + P_\infty$$

($P(t)$: 左室圧, P_0 : peak-dP/dt 時の左室圧, P_{∞} : 収縮期末容積のまま弛緩した場合の左室圧)

カテ先血圧計で左室圧が測定されているとき, 圧下降脚の時定数 (τ) は, 現在最もよく用いられている弛緩能の指標である. いくつかの方法が提唱されている¹⁰⁻¹²⁾がここでは一例のみ記述した. また, ドプラ法による左房-左室圧較差からの推定も可能である. この指標もまた収縮能や前負荷, 後負荷の影響を受ける.

充滿期の指標

1) 左室拡張早期1/3分画, 最大充滿速度, A/E 比

健常人における左室流入量の多くは, 充滿早期に流入する. 左室弛緩障害をきたすと, 急速流入期の流入量が減少し, 代償性に心房収縮による流入量が増加する. そこで, 左室造影や心 RI アンギオグラフィーなどを用いて, 拡張早期における流入分画や最大充滿速度から拡張能を評価することがある. また, 心ドプラ法で得られた僧帽弁口流入血流波形は同様の理由から, 急速流入期波 (E 波) と心房収縮期波 (A 波) の二峰性を示し, 急速流入期の方が流入速度が速いため, 健常若年者では通常 A/E < 1.0 で, E 波高が高い. 高齢者の場合や左室弛緩が遅延するような時には E 波の低下がおり, この値は 1.0 を越えるようになる. しかしながら, 房室弁口血流は心腔内圧の絶対値ではなく房室間圧較差により規定されるため, 心不全時において, 一見正常 (A/E < 1.0) のようなパターン, いわゆる pseudonormalization の形をとることがあるので注意を要する^{6, 8)}.

おわりに

いろいろな心機能の指標を示したが, 重要なことは, それらが心臓のどの機能を表す指標であるか, どの様な欠点 (負荷依存性など) があるかを理解して用いることである. また, 臨床データを見るときに, その患者の圧-容積関係を頭の中に

イメージできることが, 病態の理解を深めるには重要である.

文 献

- 1) Sagawa H, Maughan L, Suga H, et al : Cardiac contraction and the pressure-volume relationship. New York, Oxford University Press, 1988
- 2) Senzaki H, Chen CH, Kass DA, et al : Single-beat estimation of end-systolic pressure-volume relation in humans: a new method with the potential for noninvasive application. *Circulation* 94 : 2497-2506, 1996
- 3) Shishido T, Hayashi K, Shigemi K, et al : Single-beat estimation of end-systolic elastance using bilinearly approximated time-varying elastance curve. *Circulation* 102 : 1983-1989, 2000
- 4) Hayashi K, Shigemi K, Shishido T, et al : Single-beat estimation of ventricular end-systolic elastance-effective arterial elastance as an index of ventricular mechano-energetic performance. *Anesthesiology* 92 : 1769-1776, 2000
- 5) Chen CH, Nevo E, Fetis B, et al : Validation of a novel fully non-invasive method to estimate left ventricular end-systolic elastance in humans. *Circulation* 100 (Suppl I) : I-864, 1999
- 6) Gaasch WH, LeWinter MM : Left ventricular diastolic dysfunction and heart failure. Pennsylvania, Lea & Febiger, 1994
- 7) Carroll JD, Lang RM, Neumann AL, et al : The differential effects of positive inotropic and vasodilator therapy on diastolic properties in patients with congestive cardiomyopathy. *Circulation* 71 : 815-825, 1986
- 8) Feigenbaum H : Echocardiography (5th ed.). Pennsylvania, Lea & Febiger, 1994
- 9) Forrester JS, Diamond G, Chatterjee K, et al : Medical therapy of acute myocardial infarction by application of hemodynamic subset. *New Engl J Med* 295 : 1356-1362, 1404-1413, 1976
- 10) Weiss JL, Frederiksen JW, Weisfeldt ML : Hemodynamic determinants of the time course of fall in canine left ventricular pressure. *J Clin Invest* 58 : 751-760, 1976
- 11) Thompson DS, Waldron CB, Coltart DJ, et al : Estimation of time constant of left ventricular relaxation. *Br Heart J* 68 : 250-258, 1983
- 12) Matsubara H, Takaki M, Yasuhara S, et al : Logistic time constant of isovolumic relaxation pressure-time curve in the canine left ventricle: better alternative to exponential time constant. *Circulation* 92 : 2318-2326, 1995