

圧容積関係の直線性について

国立循環器病センター小児科
山田 修

心筋筋節(サルコメア)における張力-長さ関係はある長さまでは線形に増大し、よく知られたFrank-Starling関係の根底にはこの関係があり、循環における調節機構として増大した静脈還流を処理するのに役立っている。また収縮力の低下した心臓が代償を行う際に前負荷の上昇が必要なこともこれから理解される。しかしこのメカニズムは十全に解明されているとは言いがたく、最初の記述から1世紀を経過した現在なお探求が続いている¹⁾。この関係は心室においては通常圧-容積関係の収縮期末直線性として把握されるが²⁾、心内膜面での壁張力-面積関係としても理解される³⁾。イヌ、ヒトでは生理的範囲においては収縮期末圧-容積関係は直線であることはよく知られているが、この直線性を心内膜面での壁張力-面積関係に理論的に置き換えれば縦軸に壁張力、横軸に壁面積をとれば下に凸の曲線となるはずであるが、実際には直線に近似される。Gotoはこれを「複雑な心筋線維走行と心室形態の影響による」と考えているが⁴⁾、乳頭筋でのforce-length関係もL0に近いところで下に凸、Lmaxに近いところでは直線に近似されるようなデータもあり⁵⁾、心室圧容積関係が実際には上に凸のcurve-linearであるための可能性も考えられる。Sugaらによる幼犬の左室圧容積関係は上に凸の対数曲線型をしている⁶⁾。Takakiらによるとラットの左室圧容積関係もworking rangeの右方では傾斜が緩やかになっている⁷⁾。われわれのイヌ右室における圧容積関係データでもworking rangeでは直線性を有しているが、その範囲は左室よりも狭く、大きな容積域では圧が頭打ちになる⁸⁾。また良好な直線性を有している心室の場合でも収縮性の変化によって直線性が崩れることも知られている。手短かに言えば圧-容積関係の直線性はすべての種において保証された一般性を有しているわけではない。

今回著者らは力-長さ関係、壁張力-心内膜面面積関係、圧-容積関係に代わり圧-心腔断面積関係を採用して応力-ひずみ関係の再構成を試みている。収縮期末圧-(任意)心腔断面積を直線性を持っているとしているが、下大静脈閉塞という手法では通常working rangeより小さいところでの容積変化をみているに過ぎず、広範囲に直線関係が保たれるか否かは確かでない。広い範囲でみると実際には曲線関係でも、狭い範囲の変化であれば直線で近似できてしまうからである。

心腔断面積の算出には超音波AQ法を用いて自動計測を行い、Doppler血流カテテルもしくは電磁流量計カテテルにより計測した一回拍出量SVと断面積変化SA(拡張末期断面積EDA-収縮末期断面積ESA)が良い直線性を有していることを示しているがMassとして考えればこれは当然予測される結果といえる。対象とされた101例中体心室が左室形態でないのは単心室の7例とFontan術後例8例中の幾例かにすぎない。左室のような均一な形態であれば断面積変化のみならず内腔径変化もSVを反映しているはずである(ただし関係は直線的でないかもしれない)。著者らも考察で述べているように局在壁運動異常を有する場合にはSAとSVの解離が生じうるが、それ以前に壁運動異常のない場合でも右室あるいは単心室のような不均一な形態を有する場合には断面の選び方によって相違が生じる可能性がある。内腔径変化では適切に反映されない容積変化が、断面積変化では十分に評価可能であるということを中心とする主張するためには、左室形態以外の例を抽出して示してほしかったところである。このことは第2の論点である負荷独立の収縮性指標の評価にもいえる。同一心室内でも断面の選び方によってEDAが変化するため、著者らが収縮性の指標として考えているEes(圧変化/断面積変化)、SW-EDA関係の傾きMsw、dP/dtmax-EDA関係の傾きのうち第2者のみがEDAに独立であり、そのほかはたとえ壁運動異常のない場合でも断面の選び方によって同一心室内でも違った値をとることになる。Gotoらによる心内膜面での壁張力-面積関係では収縮が均一な場合には面積の大きさにかかわらず同一の値を(理論的には)とるはずであり、虚血などにより局所の収縮低下がある場合にもそれを適切に反映するとされている(実際には壁張力の算出には心内膜面の曲率が必要であるので形態が不均一な時には困難である)。

もちろん著者らはこれらの限界は十分承知のうえで*in situ*のヒトで可能な方法として考えられる今回の検討を提示しているが、従来行われてきたEFやES-Vcf関係で評価できない複雑な形態また短絡のある血行動態でこそ、本来の目的である負荷独立性の指標、心血管統合関係の評価が必要である。

また逆に超音波法を用いて単純に圧-容積関係の引き写しでない知見を得ることも可能と考える。それは圧-容

積関係には直接反映されない局所の運動が超音波では壁厚の変化としても観察可能であるからである。例えば、肺動脈狭窄におけるバルーン狭窄解除時の流出路狭窄は単純な2要素の変弾性体モデルを想定することにより説明可能であるし⁹⁾、壁運動異常を局所の応力 - ひずみ関係の定量化を通じて健常部と比較することにより重症度の定量的評価ができると考えられるが、著者らの方法を発展させることにより *in situ* におけるこのような評価が可能となることを期待する。

【参考文献】

- 1) Moss RL, Fitzsimonds DP: Frank-Starling relationship: Long on importance, short on mechanism. *Circ Res* 2002; 90: 11–13
- 2) Suga H, Sagawa K: Instantaneous pressure-volume relationship and their ratio in the excised, supported canine left ventricle. *Circ Res* 1974; 35: 117–126
- 3) Goto Y, Suga H, Yamada O, et al: Left ventricular regional work from wall tension-area loop in the canine heart. *Am J Physiol* 1986; 250: H151–H158
- 4) Goto Y, Hiramori K, Suga H: Quantitative evaluation of left ventricular regional work from wall tensio-regional area loop in canine heart. *Jpn Circ J* 1987; 51: 114–119
- 5) Hisano R, Cooper G 4th: Correlation of force-length area with oxygen consumption in ferret papillary muscle. *Circ Res* 1987; 61: 318–328
- 6) Suga H, Yamada O, Goto Y, et al: Peak isovolumic pressure-volume relation of puppy left ventricle. *Am J Physiol* 1986; 250: H167–H172
- 7) Takaki M, Tachibana H, Hata Y, et al: Mechanoenergetics of rat left ventricles in *in situ* and excised blood-perfused hearts and in unloaded rat left ventricular slices. *Heart Vessels* 1997; Suppl 12: 100–102
- 8) Yamada O, Kamiya T, Suga H: Right ventricular mechanical and energetic properties. *Jpn Circ J* 1989; 53: 1260–1268
- 9) 神谷哲郎, 山田 修: 心室血管適合から見た肺動脈弁狭窄解除後の流出路狭窄出現のメカニズム. 昭和62年度厚生省心身障害研究「小児期の主な健康障害要因に関する研究」, 1988, pp37–39