

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

(分担研究：不整脈の管理指針及び心術後
の管理指針に関する研究)

神谷 哲郎 ， 山田 修

要約：バルーンカテーテルによる肺動脈弁狭窄解除の後に出現する流出路狭窄の成因について可変弾性模型から説明することを試みた。弁狭窄による大きな後負荷に適応した高い収縮性が解除後も残るために、流出路が過大に収縮し、駆出される血液が加速されることによる圧エネルギーから運動エネルギーへの変換が流出路狭窄出現の主因であると考えられた。

見出し語：バルーンカテーテル肺動脈弁狭窄解除，流出路狭窄，可変弾性模型，ventriculo-arterial matching，

近年バルーンカテーテルによって開胸を必要としない肺動脈狭窄解除が可能となってきた。それにもない狭窄解除前後の血行動態の急激な変化を開胸，心停止等の操作が心血管に及ぼす影響なしに観察できるようになった。またこの変化は短時間の内に起こるので，それまで matching を保っていた心室と血管が平衡を失う(mismatching)ことになる。この心室と血管の mismatching という観点から，弁狭窄解除後に出現する流出路狭窄の発現のメカニズムについて，以下のごとくシミュレーションをまじえながら解明を企てた。

〈方法〉 Fig. 1のごとく右室を体部と流出路の2成分からなっていると考え，等容収縮期には両

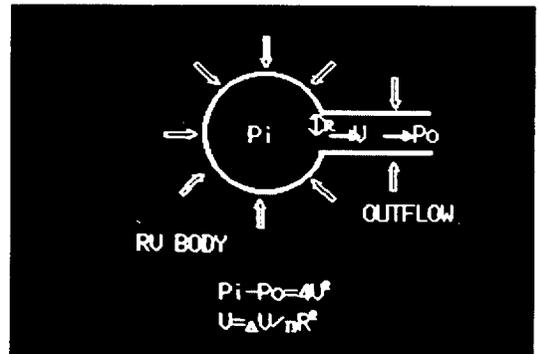


Fig. 1

成分に圧差はないとし，駆出期には血液が流出路で加速され，そのため圧エネルギーが運動エネルギーに変換されて圧損失が生じると想定する。弁狭窄解除前は高い後負荷の為に体部から押し出され

る血液の体積速度が遅くまた流出路の縮み方も小さいので加速は小さい。弁狭窄が解除された後では後負荷が減少しており体部は急速に収縮して血液を速く送り出すとともに、流出路の縮み方も大きいので加速は更に大となる。そのために加速による圧損失が弁狭窄解除前では無視し得るのに、解除後では前面に現れる。

上述の想定のもとに、基本的なパラメータを定めることにする。まず、拡張末期の値として、拡張期末体部容積 $EDVi$ 、拡張期末流出路半径 $R(0)$ 、及び長さ L 、但し流出路は円筒形で径方向にのみ短縮するものとする。体部、流出路ともに弾性係数が *time-varying* に変化するとし、駆出開始圧 Pa に達するまで、すなわち等容収縮期には何れの容積も変化せず、圧勾配はないと仮定すると、

$$Pi(t) = Po(t) < Pa; Pi(t) = Ei(t) * (EDVi - Vdi)$$

$$Po(t) = Eo(t) * (\pi R(0)^2 L - Vdo)$$

Pi : 体部内圧 Po : 流出路内圧

Ei : 体部弾性係数 Eo : 流出路弾性係数

但し、ここで便宜的に $Vdi = Vdo = 0$

また Sunagawa にしたがって、等容収縮期、駆出期をつうじて

$$Ei(t) = 1/2 \cos(1-\omega t) Ei_{max}$$

$$Eo(t) = 1/2 \cos(1-\omega t) Eo_{max}$$

と $Ei(t)$ 、 $Eo(t)$ は時間によって一義的に決定されるとする。駆出が始まるまでは、 $Pi = Po$ であるという仮定から、 $EDVi$ 、 $R(0)$ 、 L が決まっているとき、 Ei_{max} が与えられれば Eo_{max} はきまる。また収縮の時定数 ω は体部、流出路に共通である。 Pi 、 Po が Pa に達すると駆出が開始されるものとし駆出期間中、流出路からは一定値 Pa で血液が送り出される ($Po = Pa = \text{const.}$) とする。駆出が開始されると微小

単位体積 Δv を体部が駆出するのに要する時間 Δt は以下のように算出される。

$\Delta t = \Delta v / \pi R(t)^2 L * V(t)$ ここで $V(t)$ は流出路内での血液の駆出速度である。

駆出開始時の初期値 V_0 を与えてやれば、 Δt_1 は決まり、 Δt_1 が決まれば次の瞬間の $Pi(t_0 + \Delta t_1)$ は決定される。

$$Pi(t_0 + \Delta t_1) = Ei(t_0 + \Delta t_1) * (EDVi - \Delta v)$$

ここで t_0 は駆出開始の時刻 (Pi 、 Po が駆出開始 Pa に至る時刻) である。

$$Pi(t_0) = EDVi * 1/2 \cos(1-\omega t_0) = Pa \text{ から}$$

$$t_0 = 1/\omega (1 - \arccos(2Pa/EDVi))$$

更に次の瞬間の速度 V_1 は $Pi - Po = 4V_1^2$ の関係から決まる。よって、次の微小単位体積 Δv を駆出するための時間 Δt_2 も決まる。

$$\text{但し、} Po(t_0 + \Delta t_1) = Eo(t_0 + \Delta t_1) * \pi R(t_0 + \Delta t_1)^2 L$$

となるから、 $Po(t) = Pa = \text{const.}$ より

$$R(t_0 + \Delta t_1) = \sqrt{Pa / Eo(t_0 + \Delta t_1) * \pi L}$$
 と計算され、

$$\Delta t_2 = \Delta v / \pi R(t_0 + \Delta t_1)^2 * V_1$$

以下順次 $Pi(t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2)$ が決定されて行き、

V_2 、 $R(t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2)$ 、 Δt_3 も定まる。

つまり、 $EDVi$ 、 $R(0)$ 、 L 、 Ei_{max} 、 ω 、 Pa 、 V_0 をあたえてやれば、 Pi の時間的経過は決定されるわけである。

バルーンカテーテルによる弁狭窄解除の際には、前記のパラメータのうち、 Ei_{max} には変化が起こらないであろうし、拡張期指標である $EDVi$ 、 $R(0)$ 、 L にも大きな変化はないと考えられる。心拍数が一定であれば ω は著変を蒙らないと考えられ、 V_0 は単なる初期値なので一定として差し支えない。つまり Pa だけが変化するとみなしてよいだろう。上記の想定のもとに、 $Ei_{max} = 7 \text{ mmHg/ml}$ 、

EDVi = 40 ml, R(0) = 1.2 cm, L = 3 cm, $\omega = 22 \text{ m sec}^{-1}$, $V_0 = 20 \text{ cm/sec}$ とし, 狭窄解除前には $P_a = 50 \text{ mmHg}$, 解除後には $P_a = 15 \text{ mmHg}$ とし, $P_i(t)$, $E_i(t)$, $V(t)$ を算出した。

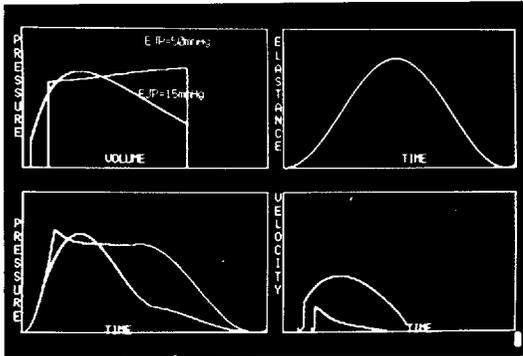


Fig. 2

〈結果〉 Fig. 2 左下に縦軸に $P_i(t)$ を, 横軸に時間 t をしめす。 $P_a = 15 \text{ mmHg}$ とした時には駆出は速く始まるものの駆出開始後も $P_i(t)$ は次第に高くなり, ピーク値としては $P_a = 50 \text{ mmHg}$ の時と殆ど変わらない。この原因は, 右下のパネルに示されるように流出路での速度が徐々に速くなることによつての圧損失によるものである。ここで同じく $P_a = 15 \text{ mmHg}$ その他のパラメータも同一の条件下に E_{imax} を次第に下げてみたのが Fig. 3 である。左下のパネルに見られるように同一の後負荷であっても駆出圧は収縮性が高いほど高い。これはやはり右下のパネルに見られるように収縮性が高いほど流出路での駆出速度が速くなるからである。ここで Fig. 2 の $P_a = 50 \text{ mmHg}$ の時と Fig. 3 の $E_{\text{imax}} = 1.5$ の時を比べてみると, 圧容

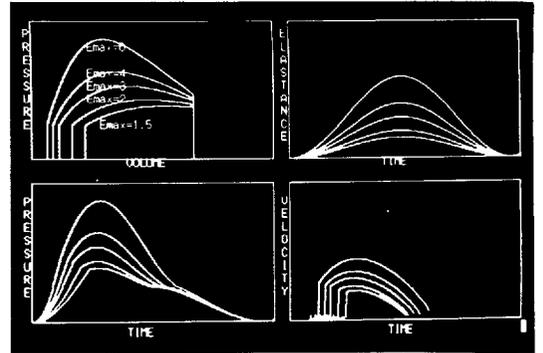


Fig. 3

積ループ, 圧時間曲線とも大きさは違うが携帯はよく類似していることが理解される。またこの両者では流出路での圧損失が小さい。すなわち, $P_a = 50 \text{ mmHg}$ に対しては $E_{\text{imax}} = 7$ が, $P_a = 15 \text{ mmHg}$ に対しては $E_{\text{imax}} = 1.5$ が matching のとれた組合せと言える。

〈考案〉流出路狭窄出現のメカニズムについては, 流出路中隔を介しての左室の影響による等の諸説がある。しかし今回示したように, そのメカニズムは二要素可変弾性模型に基づいて, また圧差が流速の変化によって生じると仮定して説明が可能である。弁狭窄があるとき右室はその負荷に対して収縮性を上げて適応している。狭窄を解除した直後には右室はまだ高い収縮性を保っている。そのため既に下がってしまった後負荷との間に mismatching が生じることが流出路狭窄の発現の原因である。狭窄解除後遠隔期に流出路狭窄も消失するのは右室の収縮性が低下し, 後負荷と再び matching を取り戻すからだと理解できる。



検索用テキスト OCR(光学的文字認識)ソフト使用

論文の一部ですが、認識率の関係で誤字が含まれる場合があります



要約:バルーンカテーテルによる肺動脈弁狭窄解除の後に出現する流出路狭窄の成因について可変弾性模型から説明することを試みた。弁狭窄による大きな後負荷に適応した高い収縮性が解除後も残るために、流出路が過大に収縮し、駆出される血液が加速されることによる圧エネルギーから運動エネルギーへの変換が流出路狭窄出現の主因であると考えられた。