

超音波Doppler法とカテーテルの狭窄部圧較差測定値に相違をもたらす因子

埼玉医科大学付属病院小児心臓科
先崎 秀明

われわれは、ある計測値をもとに評価を行う場合、常にその計測値が持つ限界を含めた特性を十分に理解したうえであつなければならぬ。超音波Doppler法による狭窄部圧較差の計測は、非侵襲性、簡便性の面から、臨床上非常に有用であるが、その計測値は、カテーテルによる実測値との間に差を生じ得るいくつかの可能性を内在していることを理解していることは重要である。

Doppler法とカテーテルによる狭窄部圧較差の計測に違いを生じる可能性の第一に、連続波Dopplerによる圧較差が随時圧の差であるのに対して、カテーテルの計測はpeak圧の差であることが挙げられる。一般に、狭窄部後の圧の最大点は狭窄部前の圧最大点より時相が遅れるため、随時圧較差の最大値のほうがpeak圧の差の最大より大きくなる¹⁾。しかしながら、実際にカテーテルにおいて随時圧の差を計測した場合でも、連続波Dopplerの計測値との間になお間違い(多くはDoppler値が大きい)が生じることが知られている²⁾。

この大きな要因として挙げられるのが、流体力学に基づく、いわゆる“pressure recovery”効果である²⁻⁴⁾。すなわち、狭窄部を通過したjet血流は、圧が最小値となる点を形成(縮流)後に拡散し、流速が減速、圧は狭窄部通過に伴うエネルギーロス(主として熱)を反映したレベルにまで回復する。血流速は、この縮流が起こる点、すなわち圧の最小点で最大となり、この最大血流速を連続波Dopplerはとらえることとなる。一方、この縮流に基づく圧の回復は、非常に短い距離で起こり、実際にカテーテルをこの縮流地点に保持することは不可能であるため、カテーテルによる狭窄部後の測定圧は、血流が拡散した部位の圧となり、pressure recoveryに相当する分、Doppler計測による圧較差が大きくなることになる。

このpressure recovery効果により、連続波Dopplerエコーによる圧較差は、カテーテルによる圧較差より大きくなるように働くが、実際には、両者が一致する、あるいはカテーテルによる差のほうが大きいことも経験する。元来、Dopplerによる狭窄部圧較差の計測は、Bernoulliの式：

$$\Delta P = \rho (V_2^2 - V_1^2) / 2 + \text{粘性効果} + \text{加速効果}$$

ρ : 血液密度, V_1 : 狭窄部前血流速, V_2 : 狭窄部後血流速

を簡略化した簡易Bernoulliの式、 $\Delta P = 4 \times V_2^2$ に基づいて算出している。弁性狭窄の場合、上記 V_1 は通常1m/sよりはるかに小さく、計算上ほとんど無視できると考えられるが、粘性効果や加速効果を無視していることは、圧較差の過小評価につながる可能性がある。Capeらは²⁾、血流の慣性力と粘性力の比で定義されるReynolds数を導入し、粘性効果の相対的重要性とpressure recovery効果の関与に関して統合を試みている。すなわち、Reynolds数が非常に小さい場合、その定義により、血流粘性効果の相対的重要性が増し、簡易Bernoulliの式の粘性項削除に基づくDoppler計測圧の過小評価をもたらす。狭窄の程度の指標に、平均圧較差を用いることがあるが、その場合、Dopplerとカテーテルによる圧較差の相違は、最大圧較差を用いた場合より小さくなる、あるいは、Doppler値のほうがカテーテルの値より小さくなることが知られている⁵⁾。これは、平均圧がReynolds数の非常に小さい駆出の開始および終了点も含んだ値であるためと理解できる。一方、血流がある程度以上のReynolds数を持つと、粘性力の要素の重要性は小さくなり、pressure recovery効果によるDoppler計測の過大評価の傾向が強くなるが、Reynolds数がさらに増加して乱流の要素が非常に高まると、狭窄部通過に伴うエネルギーロスが大きくなり、その結果pressure recoveryが減少し、Doppler/カテーテル両測定値は再び合致する方向に向かうことになる。したがって、狭窄部を通過する血流の慣性/粘性の比によって、簡易Bernoulliの式を用いたDoppler計測値がカテーテルによる実測値に対しさまざまな値をとり得ることとなる。それでは、実際の臨床の場でReynolds数が小さくDoppler計測値が過小評価となるのは、どのような場合であろうか。Reynolds数の定義の分子にあたる慣性力は、血流速と弁口面積で決定されるので、新生児期critical ASのようなsevereな狭窄に心拍出が追いつかないような、弁口面積も血流速もともに小さい症例が典型例であろう。一方、われわれがより多く遭遇するPSやASの症例は、狭窄に伴う後負荷上昇に心収縮力が適応し、心拍出が保たれていることが多いため、ある程度の弁口面積に対し、早い血流速を有する結果、Reynolds数は比較的大きな値をとり、pressure recoveryの要素からDoppler値がカテーテル値よりも大きくなる傾向が強いと考えられる。Lemlerらは⁶⁾、実

際に先天性ASの症例においてReynolds数を算出し、Reynolds数が4,000から7,000ぐらいの範囲においては、Doppler値がカテーテル値よりも大きくなり、それ以上になると一致する傾向をとることを示している。

以上は、Doppler/カテーテル同時計測時にも起こり得るDopplerとカテーテルの圧較差計測に違いを生じる要因であるが、通常われわれは、安静時超音波Dopplerによる計測をもとに、後日、より深い鎮静/麻酔下でのカテーテル検査を企てるため、Doppler/カテーテル両測定時の血行動態の変化が、両者の測定値の差異に影響を与える可能性がある。森らの論文は、この要素に注目し、これまでカテーテルに携わる臨床医の多くがおそらく感覚的には想定していたと思われる麻酔による心拍出量変化の影響を、より定量的に評価した点は意義があると思われる。しかしながら、著者らの検討では、安静時Dopplerによる圧較差に対する麻酔下カテーテル測定による圧較差の減少率(62.5%)は、13例における安静時Dopplerによる圧較差に対する麻酔下Dopplerによる圧較差の減少率(75.5%)に比して10%以上も大きい値を示している。すなわち、著者らの症例におけるDopplerとカテーテル値の違いには、従来の報告にみられるようにDoppler計測に内在するpressure recovery効果による圧較差の過大評価の可能性もあることも否定できない。また、9症例における1回拍出量の低下と圧較差の減少との相関にばらつきが多いのも、麻酔による血行動態変化以外の要因の関与を強く示唆するものである。

今回、森らの研究は、「カテーテル前の超音波検査においては、圧較差が大きかったのに、実際balloonを予定してカテーテルを行ったら圧較差がそれほど小さくなく、さて治療をしたらよいものかどうしようか判断に迷ってしまう」という、われわれが日常診療上よく経験することが動機となったものと思われるが、ここで再確認しておくべきことは、Hayesらが報告した肺動脈狭窄の治療適応基準の圧較差50mmHg以上という指標は⁷⁾、そもそもがカテーテル検査に基づくものであり、原著には麻酔の有無を含めた詳細な麻酔方法の記載がないにせよ、今回森らの報告をもとに術前超音波で圧較差50mmHg以上あればballoonを施行しても差し支えないという結論は導かれないことは言うまでもないことである。今後は、どのような条件の下で測定したどの位の圧較差が実際の臨床経過と最も合致するかを、他の指標も含めて多角的かつ前方視的に検討し、より良い治療基準を定めていかななくてはならないと思われる。本研究を含め、Doppler/カテーテル測定値の差に与える因子の十分な理解と応用は、その大きな一助となると考える。

【参考文献】

- 1) Currie PJ, Hagler DJ, Seward JB, et al: Instantaneous pressure gradient: A simultaneous Doppler and dual catheter correlative study. J Am Coll Cardiol 1986; 7: 800-806
- 2) Cape EG, Jones M, Yamada I, et al: Turbulent/viscous interactions control Doppler/catheter pressure discrepancies in aortic stenosis. The role of the Reynolds number. Circulation 1996; 94: 2975-2981
- 3) Voelker W, Reul H, Stelzer T, et al: Pressure recovery in aortic stenosis: An in vitro study in a pulsatile flow model. J Am Coll Cardiol 1992; 20: 1585-1593
- 4) Laskey WK, Kussmaul WG: Pressure recovery in aortic stenosis. Circulation 1994; 89: 116-121
- 5) Bengur AR, Snider AR, Meliones JN, et al: Doppler evaluation of aortic valve area in children with aortic stenosis. J Am Coll Cardiol 1991; 18: 1499-1505
- 6) Lemler MS, Valdes-Cruz LM, Shandas RS, et al: Insights into catheter/Doppler discrepancies in congenital aortic stenosis. Am J Cardiol 1999; 83: 1447-1450
- 7) Hayes CJ, Gersony WM, Driscoll DJ, et al: Second natural history study of congenital heart defects. Results of treatment of patients with pulmonary valvar stenosis. Circulation 1993; 87 (2 Suppl): I28-37