

## 原著

肺動脈造影用カテーテルを用いてモニターした  
血圧波形は正確か

杵淵 嘉夫\*, 鈴木 利保\*, 滝口 守\*  
山崎 陽之介\*, 山本 道雄\*

## 要 旨

肺動脈造影用カテーテルの主ルーメンの周波数特性を測定した。外形が7 Fr, 110 cmと5 Fr, 50 cmの2群, それぞれ材質がポリ塩化ビニールとポリウレタンの2種を対象とした。主ルーメンを脱気した乳酸加リンゲル液で満たし, 側孔に正弦波状に変化する圧を加えて, 振幅の周波数特性を測定した。Arrow, B. Braunについては固有周波数と制動係数は5 Fr, 7 Frとも50 Hz以上, 0.13以下, 無歪でモニターすることができる最高周波数は12 Hz以上となり, 圧モニター用肺動脈カテーテル(2ルーメン, 先端孔)より優れた特性を示した。Baxterについては前2社と比較してカテーテルの基材が柔らかいため, 特性はやや劣り, 7 Fr, 5 Frともそれぞれ固有周波数と制動係数は38 Hz前後, 0.15以下, 最高周波数は9 Hzであった。各社とも忠実な肺動脈圧波形を得ることができ, 側孔から圧を導入する影響はない。比重が1.4程度, 粘度が水の14倍程度の“重い”造影剤が高い注入圧で押し込まれるため, 主ルーメンは肉厚な構造となっている。その結果, ルーメンのコンプライアンスが低下し, 周波数特性が著明に改善されたと結論できる。

## はじめに

肺動脈造影用カテーテルの構造は, 図1の断面図(目盛線の間隔は0.1 mm)に示すように, 造影剤を通す内径の大きな主ルーメンとカフに通じて

いる内径の小さなルーメンから成っている。また, 図2(目盛線の間隔は1 mm)に示すように, 主ルーメンの先端は盲端となり, 先端からカフを隔てた10 mm前後の部分に1列に4(7 Fr)ないし3個(5

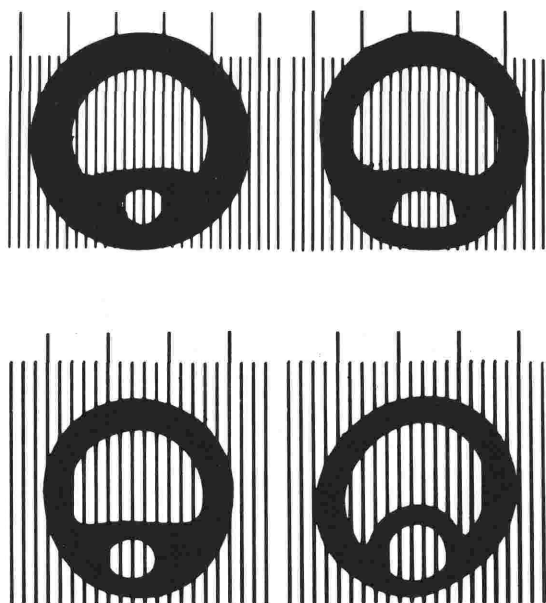


図1 肺動脈造影用カテーテルの断面

目盛り線の間隔は0.1 mmである。上段が7 Fr, 下段が5 Frの断面を示す。それぞれ左がB. Braun 207と2005, 右がBaxter 93A-191-7 fと93-130-5 fである。ArrowとB. Braunの他の1種はB. Braun 207と2005とそれぞれ同形である。

\*東海大学医学部麻酔科

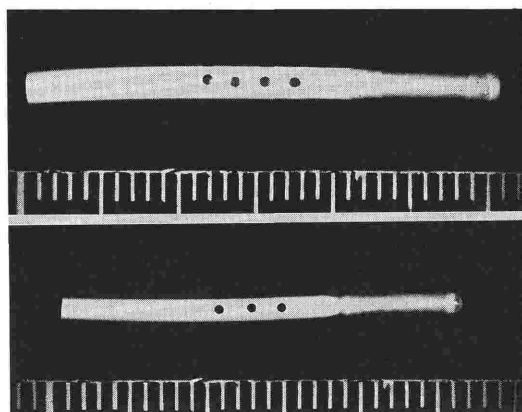


図2 肺動脈造影用カテーテルの先端部の側孔

目盛り線の間隔は1 mmである。上が7 FrのB. Braun 207, 下が5 FrのB. Braun 2005である。側孔は1列にそれぞれ4個と3個, 90度ずれてもう1列配置されている(図では7 Frの上縁に微かに見える)。

Fr)の側孔が約90度の角度で2列並んでいる。もちろん, この側孔の配置は造影剤を速やかに広く拡散させるためである。2列に配置することによって先端が血管の内壁に触れても造影剤の拡散を妨げることはない。

造影剤を通す主ルーメンは肺動脈圧のモニターとしても利用される。この場合, 複数, かつ, 方向の異なる側孔から圧を導入することになり, 先端から圧を導入する2ルーメンの圧モニター用肺動脈カテーテルとは特性が異なるのではないかと懸念される。“重い”造影剤の影響も無視できない。そこで, 正弦波様に变化する圧をカテーテルに加え, 正弦波の周波数を変えたときの側孔+主ルーメンの周波数特性を測定した。得られた周波数特性から固有周波数と制動係数を求め,  $f_n - \zeta$  チャート(付録参照)を用いて圧波形の信頼度を評価した。

### 対象と方法

表1に対象とした肺動脈造影用カテーテルを示す。カテーテルはB. Braun, Arrow, Baxterの3社から7 Fr, 110 cmと5 Fr, 50 cmの2種類, 材質は7 Frと5 Frについてそれぞれポリ塩化ビニールとポリウレタンを用意した。

図3に周波数特性の測定のためのダイアグラムを示す。コンピュータ(PC9801, NEC, JAPAN)によって制御されたプログラマブル発振器(OSC

2 L, Japan Circuit Design, JAPAN)の出力をパワーアンプを介してラウドスピーカ(P5160, Fostex, JAPAN)に加える。ラウドスピーカの振動をトランスデュサドーム(1295C, Hewlett Packard, USA)の膜に伝えて圧源とした。振動の周波数は1~65 Hzとした。カテーテルをトランスデュサドームの圧出口にシーリングテープを用いて固定し, もう一つの圧出口にレファレンス用のトランスデュサ(P50, Spectramed Medical products, USA)を接続した。カテーテルの他端に同型のトランスデュサを接続し, ドームおよびカテーテルを脱気した乳酸加リンゲル液で気泡が入らないように慎重にブライミングした。それぞれの圧出力を増幅器(AP600G, Nihon Kohden, JAPAN)と12ビットAD変換器(AnalogPro II, Canopus Electronics, JAPAN)を介してコンピュータに読み込んだ。AD変換器のサンプリング間隔は2 msecとした。プログラムにより, 2つの圧信号の振幅比を求め, 低周波から順に周波数を変えて振幅の周波数特性を作成した。ついで, 次式により固有周波数 $f_n$ と制動係数 $\zeta$ を算出した<sup>1,2)</sup>。

$$\zeta^2 = \{1 \pm (1 - 1/A_p^2)^{1/2}\} / 2 \quad (1)$$

$$f_n = f_p / (1 - 2\zeta^2)^{1/2} \quad (2)$$

ここに,  $f_p$ は共振周波数,  $A_p$ は共振振幅の大きさを表す。

次に, 実測した固有周波数 $f_n$ と制動係数 $\zeta$ を $f_n - \zeta$ チャート<sup>3,4)</sup>にプロットし, そのカテーテルの系が忠実にモニターすることができる最高の周波数 $f_n$ (肺動脈圧波形に含まれる最も高い周波数成分)と時間遅れ $t_d$ (側孔に加えて圧波形とモニターした圧波形の時間差)を求めた。

表1 肺動脈造影用カテーテルの諸元

Pulmonary angiographic catheter	材質	太さ Fr	長さ cm	側孔数
Arrow Berman AI-07137	pvc	7	110	8
B. Braun Corodyn 207	pu	7	110	8
B. Braun Corodyn 207-1	pvc	7	110	8
Baxter SwanGanz 93A-191-7f	pvc	7	110	8
Arrow Berman AI-07137	pvc	5	50	6
B. Braun Corodyn 2005	pu	5	50	6
B. Braun Corodyn 2005-1	pvc	5	50	6
Baxter SwanGanz 93-130-5f	pvc	5	50	6

カテーテルの材質はpuがポリウレタンを, pvcがポリ塩化ビニールを示す。側孔の数は総数を表し, 図2に示すように半管ずつ2列に配置される。

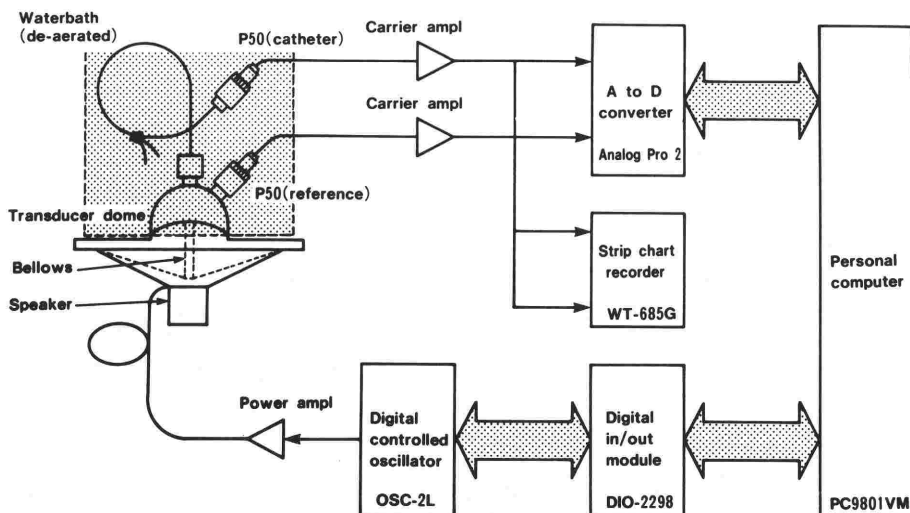


図3 周波数特性の測定

コンピュータで制御されたプログラマブル発振器の出力をパワーアンプを介してスピーカーに加え、その振動をドーム内の膜に伝えて圧源とする。ドーム内圧とカテーテルを介した圧信号をコンピュータに読み込み、周波数特性を作成し、共振周波数と共振振幅を読みとって固有周波数と制動係数を算出する。

## 結果

図4(1)と(2)はそれぞれ7Frと5Frの周波数特性である。横軸は振動の周波数を表わす。縦軸( $A/A_0$ )は加えた圧( $A_0$ )とモニターした圧( $A$ )の振幅比を表わし、振動の周波数が十分に低いとき1である。振幅比のピーク点が共振周波数 $f_p$ と共振振幅 $A_p$ を与える。いずれも同一のカテーテル数本について測定を繰り返し、最も $f_n$ が大きくかつ $\zeta$ が小さい場合をそのカテーテルの周波数特性とした。7Frと5Frいずれの場合もB. Braunの2種とArrowには特性上の差はほとんど認められなかった。

図4から $f_p$ と $A_p$ を求め、式(1)と(2)から計算した $f_n$ と $\zeta$ を表2( $f_p$ ,  $A_p$ ,  $f_n$ ,  $\zeta$ )に示す。ばらつきはあるものの、これらの値は同形の先端孔を持つ圧モニター用肺動脈カテーテルの特性<sup>2,5,7</sup>と同等ないし、より優れた特性である。それゆえ、側孔から圧を導入する影響はないとしてよい。

表2に示した一対の $f_n$ と $\zeta$ を $f_n$ - $\zeta$ チャートにプロットすると図5になる。Aが7FrのB. Braunの2種とArrowに該当し、最高周波数が14Hz程度、時間遅れが2msec以下であることを示している。Bが5FrのB. Braunの2種と

Arrow, CとDがそれぞれ7Frと5FrのBaxterに該当する。これらの結果を表2( $f_n$ ,  $t_d$ )に示す。最高周波数が最も低い場合でも、9Hzあり、肺動脈圧波形に含まれる最も高い周波数成分<sup>3,6</sup>を超えている。これは、側孔から圧を導入しても肺動脈圧波形に対する影響はなく、7Fr, 110cmのカテーテル4種および5Fr, 50cmの4種ともに忠実な波形を得ることができるとしてよい。ただし、これらの周波数特性は実験室で脱気した乳酸加リングル液を用いた限界特性である。

## 考案

肺動脈造影用カテーテルの断面は図1に示したように圧モニター用肺動脈カテーテルとほとんど同じ構造である<sup>5</sup>。“重い”造影剤が高い注入圧で押し込まれるため、外套の肉厚が肺動脈カテーテルより厚くなっており、その結果、ルーメンのコンプライアンスが圧モニター用肺動脈カテーテルより低いと推定される。後で述べるようにコンプライアンスの低下、すなわち、ヤング率の増加によって $f_n$ が増加し、 $\zeta$ も低下するので、周波数特性が著しく改善されるのである。圧モニター用肺動脈カテーテルの $f_n$ と $\zeta$ は46Hzと0.13程度と報告されているから<sup>2,5,7</sup>、むしろ肺動脈造影用カ

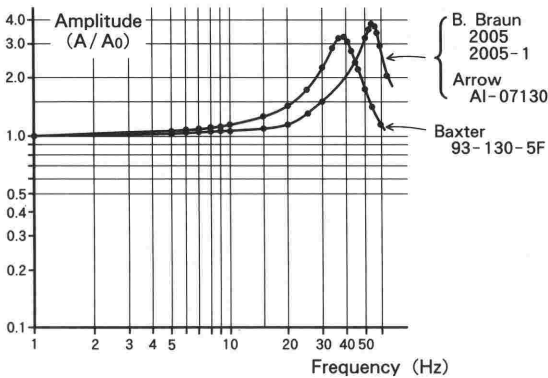
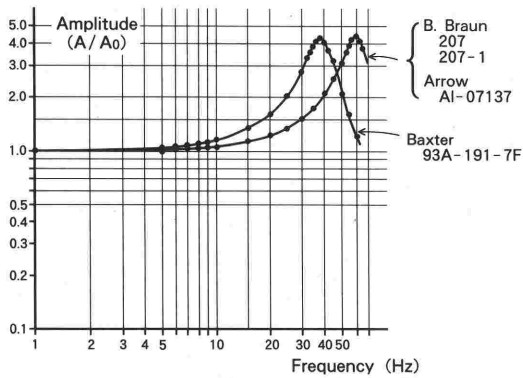


図4 肺動脈造影用カテーテルの周波数特性  
縦軸は周波数0のときの振幅を1としてある。(1)が7Fr, (2)が5Frの特性を示す。(1)(2)ともにB. Braunの2種とArrowの特性はほとんど差はなく同一と見なせる。

テーテルの方がより優れた特性を持っている。7Frの場合のBaxterの特性がB. Braunの2種とArrowの特性よりやや劣る理由も同じである。Baxterの肉厚は他の3種より明らかに薄く(図1参照), 結果としてコンプライアンスが大きくなるからである。なお, すでに述べたように7Frの4種のカテーテルは圧波形のモニターとして十分な周波数特性を持っており, Baxterの場合は血管損傷を避けるためなるべく柔らかいカテーテルを目指したと考えるべきであろう。カテーテルの柔らかさの周波数特性への影響は小児用の5Frのカテーテルの場合にもっと顕著になる。7Frの場合と同様, Baxterの特性はB. Braunの2種とArrowの特性より明らかに劣る。Baxterの肉厚は他の3種より薄く(図1参照),

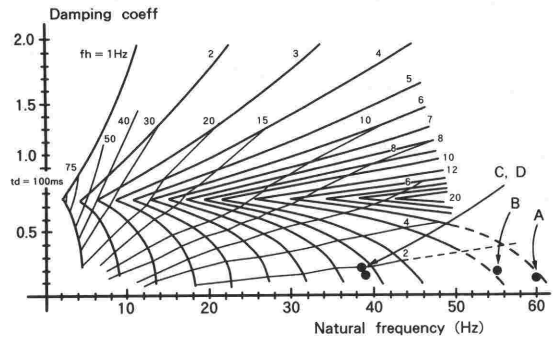


図5  $f_n$ - $\zeta$ チャート  
表2の結果を $f_n$ - $\zeta$ チャート上に一对の( $f_n$ ,  $\zeta$ )としてプロットすると図のA~Dが得られる。A~Dの位置から $f_h$ と $t_d$ を読みとることができる。 $f_n$ - $\zeta$ チャートについては本文および付録を参照。

表2 肺動脈造影用カテーテルの周波数特性

Pulmonary angiographic catheter	fr Hz	Ar A/Ao	fn Hz	$\zeta$	fh Hz	td msec
Arrow Berman AI-07137	59.5	4.4	60.6	0.11	14	>2
B. Braun Corodyn 207	59.5	4.4	60.6	0.11	14	>2
B. Braun Corodyn 207-1	59.5	4.4	60.6	0.11	14	>2
Baxter SwanGanz 93A-191-7f	38.5	4.3	39.4	0.12	8.8	2.0
Arrow Berman AI-07137	54.0	3.8	54.9	0.13	12	>2
B. Braun Corodyn 2005	54.0	3.8	54.9	0.13	12	>2
B. Braun Corodyn 2005-1	54.0	3.8	54.9	0.13	12	>2
Baxter SwanGanz 93-130-5f	38.0	3.3	38.9	0.15	8.8	2.0

$f_n$ は共振周波数,  $A_r$ は共振振幅,  $f_n$ は固有周波数,  $\zeta$ は制動係数,  $f_h$ は最高周波数,  $t_d$ は時間遅れを示す。fr,  $A_r$ ,  $f_n$ および $\zeta$ は図4から,  $f_h$ と $t_d$ は図5から導かれる。詳細は本文を参照。

かつ柔らかい塩化ビニールを基材に使用しているからである。このため、挿入時にマンドリンを使用するようになっている。

要約すれば、造影剤を通すために肉厚のルーメン構造を採用した結果、周波数特性が著しく向上し、側孔より圧を導入する不利を補い、忠実な肺動脈圧波形を得ることができる。これらの結果は圧モニター用肺動脈カテーテルのルーメンの構造にも応用されてよい<sup>5)</sup>。複数の側孔を持った肉厚の圧モニター用肺動脈カテーテルなら、長時間にわたって安定な圧のモニターができよう。もっとも、この構造では造影用カテーテルとの差がなくなってしまうが。

固有周波数と制動係数はカテーテルの形状とプライミング液の性状によって一義的に決定される。ルーメンの内腔が円筒である（圧は先端から導入される）と仮定したときの理論値は、以下のとおりである<sup>1,8,9)</sup>。

$$f_n = 0.122 \cdot d \cdot \text{SQR} (E/L\rho) \quad (3)$$

$$\zeta = 15.6 \cdot \mu \cdot d^3 \cdot \text{SQR} (L/E\rho) \quad (4)$$

ここにLはルーメンの長さ (cm), dはルーメンの内径 (cm), Eはルーメンと内液のヤング率 (dyne/cm<sup>2</sup>),  $\rho$ は内液の密度 (g/cm<sup>3</sup>), および $\mu$ は内液の粘性 (g/cm/sec)である。先に述べたコンプライアンスはヤング率の逆数である。ルーメンの肉厚が厚くなるとコンプライアンスが低下し、式(3)と(4)のEが増加する。その結果、 $f_n$ が増加し、 $\zeta$ が低下して周波数特性が改善される。

造影剤は使用目的や部位によってヨード含有量が異なり、その物理的な性状が大きく変化する。肺動脈造影を目的とする場合、比重は水の1.2~1.4倍、粘度は水の1.8~14倍程度まで変動する<sup>10)</sup>。比重と粘度はそれぞれ、式(3)と(4)の $\rho$ と $\mu$ に相当する。それゆえ、造影剤がルーメン内にプライミングされた状態では表2の値と比較して、 $\zeta$ は10倍以上に増大し、明らかな過制動状態 ( $\zeta < 0.7$ )になる。図5の $f_n - \zeta$ チャートからも明らかなように $\zeta$ の増大によって最高周波数 $f_n$ が低下し、時間遅れ $t_d$ が増加する。要するに造影剤をプライミングした状態では圧波形のモニターはできない。ヘパリン化静注液でフラッシュ、プライミングしておく必要がある。

付録： $f_n - \zeta$ チャート<sup>3,4)</sup>

圧波形は多数の周波数成分によって構成されて

いる。圧波形の変形は、周波数によって、成分毎の振幅の変化の程度がことなることや周波数成分毎にカテーテルを通過する時間（位相差）が異なることによって起こる。変形の程度を定量的に表わすために振幅と位相差の誤差の許容範囲を定義する。まず、振幅の大きさの変化が5%以内を振幅誤差の許容範囲と定義する。次に、位相差の増加が周波数の増加と直線関係にあるとき、波形は無歪のまま伝わる。それゆえ、位相差の周波数に対する直線との誤差が $\pm 5\%$ 以内を位相誤差の許容範囲と定義する。カテーテル内の圧伝播の過程を2次系として扱い、2次系の伝達関数から導かれる振幅と位相差の周波数特性が、これらの許容範囲にある周波数の上限を計算する。周波数の上限値が最高周波数 $f_n$ に相当する。振幅と位相差の周波数特性は固有周波数 $f_n$ と制動係数 $\zeta$ をパラメータとした関数であり、上記の最高周波数もまた固有周波数と制動係数をパラメータとして表わされる。逆に、カテーテルを用いた圧測定系の固有周波数と制動係数を実測すると、誤差を許容できる最高周波数を知ることができる。これら3者の関係を図に示したものを $f_n - \zeta$ チャートと呼ぶ。また、3者の関係から、圧波形がカテーテルを通過するに要する時間、すなわち、時間遅れ $t_d$ もチャート上で定めることができる。

## 文 献

- 1) Fry DL: Physiologic recording by modern instruments with particular reference to pressure recording. *Physiol Rev* 40: 753-788, 1960
- 2) Hipkins SF, Rutten AJ, Runciman WB, et al: Experimental analysis of catheter-manometer systems in vitro and in vivo. *Anesthesiology* 71: 893-906, 1989
- 3) 杵淵嘉夫, 鈴木利保, 山崎陽之介ほか: カテーテルを用いた圧導出系の周波数特性とその評価法. *循環制御* 12: 111-119, 1991
- 4) Yoshio K, Toshiyasu S, Mamoru T, et al: Evaluation of dynamic response of catheter-manometer systems for pulmonary artery pressure. *J Appl Physiol* 77(4): 2023-2028, 1994
- 5) 杵淵嘉夫, 鈴木利保, 山崎陽之介ほか: スワンガンツカテーテルの周波数特性の限界. *循環制御* 13: 89-95, 1992
- 6) Milnor WR: Pulsatile blood flow. *N Engl J Med* 287: 27-34, 1972
- 7) Patel DJ, Mason DT, Ross J, et al: Harmonic analysis of pressure pulses obtained from the heart and great vessels of man. *Am Heart J* 69: 785-794, 1965
- 8) Geddes LA: The direct and indirect measurement of blood pressure. Year Book Medical Publishers, Chicago

go, 1970, pp49-66

- 9) Gersh BJ : Measurement of intravascular pressures, Edited by Prys-Roberts C: The circulation in anaesthesia : Applied physiology and pharmacology. Blackwell

Scientific Publications, Oxford, 1980, pp511-518

- 10) 小塚隆弘, 打田日出夫 : 造影剤要覧. 日本シェーリング社, 大阪, 1995, pp7-36

## Frequency Characteristics of Pulmonary Angiographic Catheters

Yoshio Kinefuchi, Toshiyasu Suzuki, Mamoru Takiguchi,  
Yonosuke Yamasaki and Michio Yamamoto

Department of Anesthesiology, Tokai University School of Medicine  
Isehara, Japan

Frequency characteristics were determined of eight models of pulmonary angiographic catheters from 3 manufacturers (Arrow, B. Braun, Baxter) in a deaerated lactated Ringer's solution. The frequency characteristics was related to the structure of the lumen, and the structure of a thick-wall and a circular cross section (Arrow, B. Braun) proved to have a better frequency characteristics than that of radial cross section partitioned with thin walls (Baxter). The former proved to have the natural

frequencies of 55 to 61 Hz up, and damping coefficients of 0.13 to 0.11, and the latter, 38 to 39 Hz, 0.15 to 0.12, respectively. Overall superiority in frequency characteristics of these angiographic catheters was found as compared with those of the open end catheters for pulmonary artery wedge-pressure measurement. There were no differences in the catheters made of polyvinyl chloride and those made of polyurethane.

**Key Words** : Pulmonary angiographic catheter, Frequency characteristics,  
Natural frequency, Damping coefficient

(Circ Cont 16 : 527~532, 1995)