

PAC (pulmonary artery catheter) の周波数特性の限界

杵 渕 嘉 夫* 鈴 木 利 保* 竹 山 和 秀*
山 崎 陽 之 介* 山 本 道 雄*

要 旨

脱気した乳酸加リンゲル液中で PAC (pulmonary artery catheter) を用いた圧導出系の周波数特性を実測すると、標準的な PAC (7 Fr, 4 ルーメン, 有効長 110 cm) の固有周波数と制動係数はそれぞれ 28.5~41.2 Hz, 0.16~2.2 となり、通常の臨床手順で組み立てた系と比較すると固有周波数は 2~3 倍以上、制動係数は同程度に低下する特性が得られた。供給元の公称値や PAC の諸元から求めた計算値とも概ね合致し、限界周波数特性と考えられる。PAC の限界周波数特性は同じ条件下ではルーメンの構造に依存し、肉厚で円形のルーメン構造が薄い隔壁で分割された扇形のルーメン構造より優れた周波数特性を示した。5 ルーメンと 2 ルーメンの PAC の限界周波数特性は上記の標準的な PAC より劣り、同じ理由によると推定された。また、限界周波数特性は材質にも依存し、ポリ塩化ビニール製がポリウレタン製より優れた特性を示した。市販の制動素子は限界周波数特性に対して、固有周波数をやや低下させるが、良好な制動効果を示した。延長チューブの付加と空気の注入によって固有周波数と制動係数はともに劣化し、臨床使用状態が再現された。臨床使用下での限界周波数特性の実現が今後の課題である。

はじめに

PAC (pulmonary artery catheter) の周波数特性を規定する固有周波数と制動係数は供給元の規

格によると 7 Fr, 4 ルーメン, 有効長 110 cm の標準的な場合では、それぞれ 20~30 Hz, 0.15~0.20 の範囲にある。しかるに、通常の臨床手順で組み立てた系の周波数特性を実測すると、それぞれ 8~14 Hz, 0.23~0.35 にあり、およそ半分以下の特性しか得られない^{1,2)}。目視では発見できない活栓内の気泡や微小気泡、あるいは温度や圧変化によって気泡に変わり易い溶存空気存在によるものと思われる。臨床では、活栓の数が増加したり、延長チューブを追加することも多く、特性はもっと劣化していると推定される。そこで、水槽に満たした脱気水の中で全ての系を組立てて、PAC の限界周波数特性と、付加回路による劣化の程度との関係を検討した。また、PAC 側の限界周波数特性の差は PAC の材質やルーメンの構造等の物理的な特性の違いによって生ずるはずである。入手できた 20 種の PAC について、両者の関係を検討した。

1. 対象と方法

図 1 の実験系を用いて測定した¹⁾。周波数の測定範囲は 1~60 Hz とし、AD 変換器のサンプリングレートは 10 kHz とした。コンピュータ上に周波数特性を作成した後、次式により固有周波数 f_n と制動係数 ζ を算出した^{3,4)}。

$$\zeta^2 = \{1 \pm \text{SQR}(1 - 1/A_0^2)\} / 2$$

$$f_n = f_0 / \text{SQR}(1 - 2 \cdot \zeta^2)$$

ここに、 f_0 は振幅が最大になる点の周波数である共振周波数、 A_0 は共振周波数における振幅の大きさを表す。SQR は開平演算を表す。

表 1 に対象とした 20 種の PAC を示す。太さ 7.5 Fr の 3 種 (Abbott p7110-eh, Arrow

*東海大学医学部麻酔科

ah-05150-hc, Edwards 93a-431h-7.5f) は静脈血酸素飽和度測定のための光ファイバや薬液注入用の付加ルーメンを持つ5ルーメン構造である。5 Fr の2種 (Edwards 93-132-5f, Terumo s5801h) と7 Fr の B. Braun 407-75 は小児用あるいは内頸静脈や鎖骨下静脈用で、有効長は75ないし80 cm である。また、2ルーメン構造の2種 (Edwards 93-111-7f, Spectramed sp5327) は圧モニタ用である。他の PAC は6 Fr の Terumo

s6111 を除いて全て7 Fr, 4ルーメンで有効長は110 cm である。材質はポリウレタン (PU) が5種 (B. Braun 407/407-75, Goodtec t-147, Spectramed sp5107mu/sp5327) で他はポリ塩化ビニール (PVC) である。図2は各 PAC の断面構造である。図の最小目盛りは0.1 mm で図中の番号が表1の各 PAC のルーメンの形状に対応する。

乳酸加リンゲル液 (ハルトマン液 pH 8[®], ミドリ十字) 8リットルを真空ポンプを用いて約6時

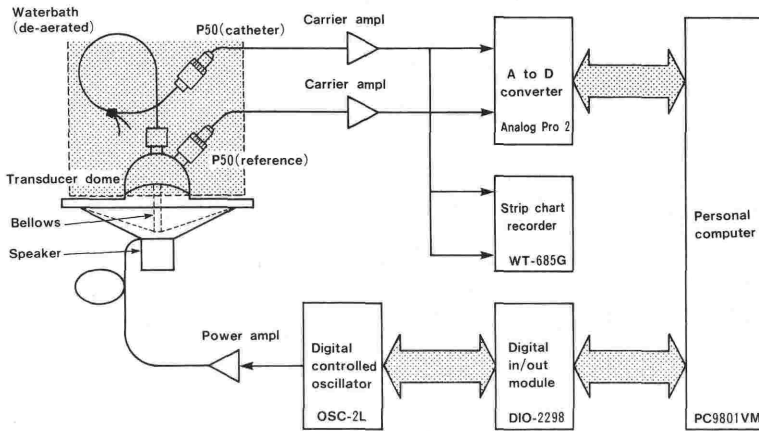


図 1

表 1

PA catheter	材質	ルーメン数	ルーメン形状	太さ Fr	長さ cm	fr Hz	Ar A/A ₀	fn Hz	ζ
Abbott p 7110-eh	pvc	5	4	7.5	110	23.6	2.3	24.9	0.23
Arrow ah-05100-hc	pvc	4	3	7	110	32.1	3.0	33.1	0.17
Arrow ah-051150-hc	pvc	5	4	7.5	110	17.2	2.5	17.9	0.21
BBraun 407-75	pu	4	3	7	75	51.4	4.0	52.3	0.12
BBraun 407	pu	4	3	7	110	29.8	3.1	30.6	0.16
BBraun 407-1	pvc	4	3	7	110	44.6	3.8	45.4	0.13
Biosensors td1704td	pvc	4	3	7	110	43.5	3.6	44.4	0.14
Edwar ds 93-111-7f	pvc	2	6	7	110	27.4	2.9	28.3	0.17
Edwar ds 93-132-5f	pvc	4	2	5	75	11.4	1.6	12.9	0.33
Edwar ds 93a-431h-7.5f	pvc	5	5	7.5	110	16.8	2.2	17.8	0.24
Edwar ds 93a-131-7f	pvc	4	2	7	110	25.9	2.1	27.6	0.24
Goodtec t-147	pu	4	3	7	110	39.3	3.6	40.1	0.14
Goodtec t-047	pvc	4	3	7	110	42.8	3.8	43.6	0.13
Spectramed sp5327	pu	2	6	7	110	40.1	3.4	41.0	0.15
Spectramed sp5107mu	pu	4	3	7	110	30.2	2.8	31.2	0.18
Spectramed sp5107m	pvc	4	3	7	110	34.2	2.7	35.5	0.19
Terumo s5801h	pvc	4	1	5	80	20.4	2.1	21.8	0.24
Terumo s6111	pvc	4	1	6	110	22.3	2.4	23.4	0.22
Terumo s7111	pvc	4	1	7	110	26.9	2.6	28.0	0.19
USVP td407h-e	pvc	4	2	7	110	30.2	2.7	31.3	0.19

間、飽和水蒸気圧下で加振しながら沸騰させて脱気した。図1の破線内の PAC と圧トランスデューサおよび圧ドームの部分はこの脱気した液中で組み立て、溶存空気や微小気泡の混入を完全に防止

した。液温は25度(室温)とした。

次に、市販の制動素子と称する Accudynamic® (Sorenson Research) と ROSE® (Spectramed Medical products) および延長チューブ2種 (PT-12, PT-48, Sorenson Research) 等の付加素子をそれぞれカテーテル終端とトランスデューサの間に挿入し、周波数特性の変化を測定する。また、同じ場所に 0.1~0.2 ml の空気を注入し、周波数特性への影響を調べる。Accudynamic® は調整ノブを有し、制動状態を変えることができるとされているので調整ノブの位置と周波数特性との関係も測定する。なお、これらの付加素子の接続もすべて脱気した液中で行った。

2. 結 果

(1) PAC の周波数特性, 固有周波数, 制動係数

表1に各 PAC の共振周波数 (f_r), 共振振幅 (A_r), 固有周波数 (f_n) および制動係数 (ζ) を示す。固有周波数は共振周波数より高く、共振振幅が大きいほど制動係数は低い。また、固有周波数が高いと概ね制動係数は低くなっている。これらの結果は2次系の特徴の1つである^{3,4)}。

材質がポリ塩化ビニールで太さ 7 Fr, 4 ルーメンで有効長 110 cm の標準的な PAC 8種の周波数特性を図3に示す。表1および図からも明らかなように、固有周波数が 40 Hz を超える3種 (B. Braun 407-1, Biosensors td1704td, Goodtec t-047) と、35 Hz 付近の2種 (Arrow ah-05100, Spectramed sp5107m), および 31 Hz 以下の3種 (Edwards 93a-131, Terumo s7111, USVP td407h) に分類される。図2に示すように、前2者は肉厚の材料実質に埋め込まれた円形のルーメン、後者は薄い外套の中にXないし十字型の隔壁で仕切られた扇型のルーメンとなっており、周波数特性の差はルーメン形状によるものと思われる。

5 ルーメンの PAC 3種 (Abbott p7110, Arrow ah-05150, Edwards 93a-431h) と 2 ルーメンの PAC 2種 (Edwards 93-111, Spectramed sp5327) の周波数特性を図4に示す。5 ルーメンの3種の固有周波数は 17~25 Hz に分布し、通常の4ルーメン形より 5~20 Hz 低い。圧ルーメンの断面積が小さいこと、および前項と同様にルーメンの形状による要因もあると思われる。ま

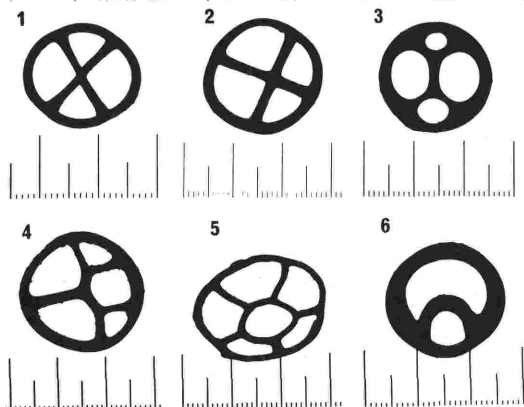


図 2

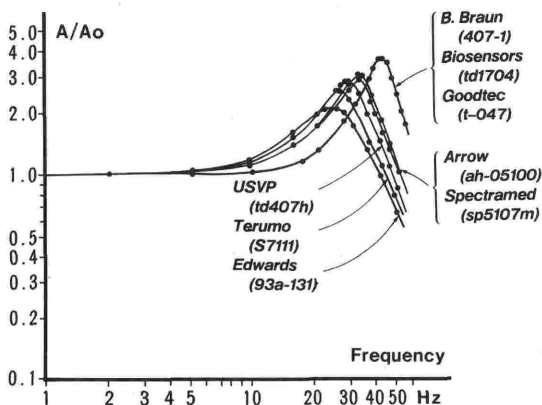


図 3

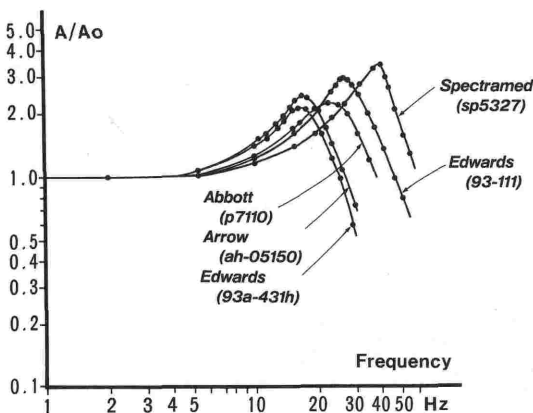


図 4

た、圧モニタ用の2ルーメン PAC の固有周波数は 28.3 Hz と 41.0 Hz で、図3に示した標準的な4ルーメンの PAC の固有周波数の分布とあまり変わらない。圧ルーメンの断面積は増加しているが、固有周波数の増加には寄与していない。やはり、前項と同様にルーメンの形状によると考えられる。

材質のみ異なり、他の諸元が同じ3対の PAC (B. Brawn 407/407-1, Goodtec t-147/t-047, Spectramed sp5107mu/sp5107m) の周波数特性を図5に示す。材質にポリ塩化ビニールを用いた方がポリウレタンより固有周波数が 3~14 Hz 程度高い。ルーメンの形状は概ね同じと見なせるので、材質自身の性質か材質に依存する成形工程の差によると思われる。

長さのみ異なり他の諸元が同じである対の PAC (B. Brawn 407-75/407) と、太さのみ異な

り他の諸元が同じである対の PAC (Terumo s6111/s7111) の周波数特性を図6に示す。固有周波数と PAC の諸元との関係はすでに明らかにされ、計算式が示されているが^{3,4)}、長さが短いほど、断面積が大きいほど共振周波数や固有周波数は高くなり、制動係数は小さくなる。結果は概ね計算式に合致する。B. Brawn 407-75 は20種の PAC で最も固有周波数が高く、制動係数が最も低い。

(2) 付加素子による周波数特性の変化

表2に付加素子を接続したときの共振周波数 (f_r)、共振振幅 (A_r)、固有周波数 (f_n) および制動係数 (ζ) を示す。周波数特性上に共振現象が無いときは、固有周波数と制動係数を計算する意義はないので“-”とし、参考値として遮断周波数(平坦な振幅特性が減衰し始める周波数を意味し、振幅値が0.7に低下する周波数)をカッコ内に示した。

表 2

Arrow ah-05100-hc	f_r Hz	A_n A/A ₀	f_n Hz	ζ
+Accudynamic closed	32.1	3.0	33.1	0.17
+Accudynamic 0. 5t	30.6	2.5	31.9	0.20
+Accudynamic 0. 75t	26.7	1.5	31.1	0.36
+Accudynamic 1. 0t	—	—	(34.5)	—
+Accudynamic 1. 5t	—	—	(7.2)	—
+ROSE	—	—	(6.8)	—
+PT-12	23.8	2.5	24.8	0.20
+PT-48	15.0	2.0	16.1	0.26
+air0. 2	—	—	(4.3)	—

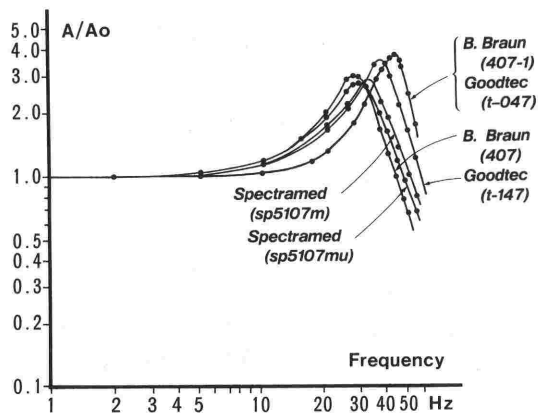


図 5

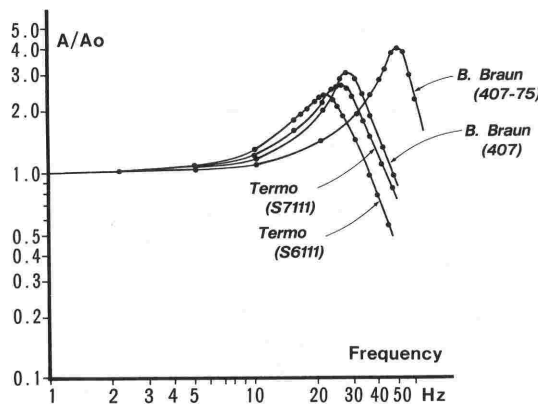


図 6

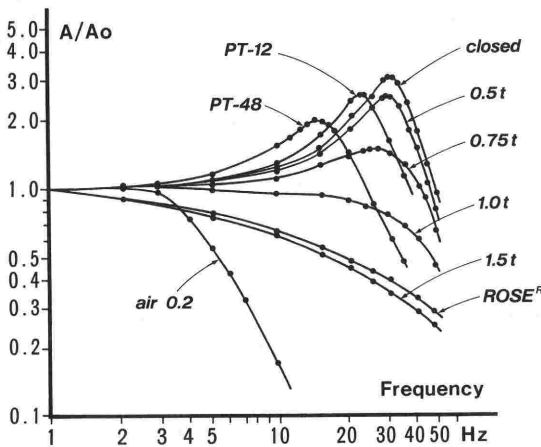


図 7

制動素子を接続したときの周波数特性の変化を図7に示す。PACは図3に示したArrow ah-05100である。Accudynamic®を挿入したときの効果は、調整ノブの回転角によってclosed~1.5tで表した。ノブを“閉”の状態から、“開いて”いくと、共振振幅は次第に減少し、共振振幅は“閉”の32.1 Hzから0.75回転時の26.7 Hzに、固有周波数は33.1 Hzから31.1 Hzまでやや低下する。制動係数は0.17から0.36まで増加している。0.85~1回転のとき共振現象は抑圧され、臨界制動が得られている。1回転以上では、明らかな周波数帯域の減少となった。ROSE®を挿入したときの効果は、Accudynamic®の1.5回転時の効果とほぼ同じとなり、明らかな過制動状態にある。ROSE®には調整装置がないので、臨界制動への改善はできない。

延長チューブ2種を付加した場合と空気0.2 mlを注入した場合の周波数特性の変化を図7にPT-12とPT-48およびair 0.2で示した。延長チューブはそれぞれ有効長30 cmと122 cmである。チューブの挿入によって共振周波数と固有周波数は8~17 Hz低下し、制動係数は0.20~0.26まで増加している。空気の注入によって共振現象は無くなり、極端な過制動状態となった。なお、周波数特性は空気の注入量や注入の場所によって変化し、図は極端に劣化した例である。

3. 考 察

充填する内液を完全に脱気し、かつ空気を遮断した状態で系を組み立てることによって、太さ7 Fr、4ルーメンで有効長110 cmの標準的なPACでは、固有周波数が45.4~27.6 Hz、制動係数が0.13~0.24を得ることができた。PACによっては供給元の公称値より高い固有周波数値が得られている。また、カテーテルの内腔を円と見なしたとき、系の諸元と固有周波数 f_n および制動係数 ζ との関係は、

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

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

で与えられる^{3,4)}。ここにLはカテーテルの長さ(cm)、dはルーメン内径(cm)、Eは系の弾性率(dyne/cm⁵)、 ρ は内液の密度(g/cm³)、 μ は内液の粘性(g/cm·sec)である。ルーメンの内腔は必ずしも円形ではないが、PACの標準的な諸元を用

いて計算すると、 $f_n = 35 \sim 40$ Hz、 $\zeta = 1.0 \sim 1.2$ となり²⁾、表1の結果と概ね一致している。つまり、表1に示した特性値は、PACの限界周波数特性と考えてもよいであろう。固有周波数について、Rutten等⁵⁾も公称値に対して実測値が半分以下であると報告しており、Gardnerの報告⁶⁾した値も同様に低い。先に報告した我々の結果^{1,2)}を含めて、これらは組み立てた系が微小気泡や溶存空気の強い影響を受けていたことを示している。しかしながら、臨床上ではこれらの影響を完全に除去することはできないので、先に述べた固有周波数8~14 Hz、制動係数0.23~0.35程度を目安とせざるを得ない。気泡処理に関する臨床的な改善方法については別な機会に報告したい。

表1のPAC間の限界周波数特性の差は材質やPACの構造等によって生じると考えられる。まず、標準的な4ルーメンのPACはその断面構造によって2つないし3つのタイプに分けることができる。円形のルーメンを持つ9種(Arrow, B. Brawn, Biosensors, Goodtec, Spectramed)と扇形ルーメンを持つ5種(Edwards, Terumo)および両者の中間形(USVP)のPACである。円形のルーメンを持つPACは中間形や扇形のルーメンを持つPACに比べて固有周波数が高く、優れた周波数特性を持つとしてよい。図2から算出した断面積は前者が0.59~0.70 mm²、後者は0.75~0.80 mm²程度あり、後者の方が大きい。しかし扇形の3つのコーナーの部分が死腔化して有効に機能しないため、有効断面積はかえって小さくなると推定される。また、後者は扇形の3面の隔壁が前者に比して薄く柔らかいため、コンプライアンスが大きく(ヤング率が小さく)なると推定される。圧モニタ用の2ルーメンPACの固有周波数が4ルーメンPACより低い理由も同様である。この2種のPACの圧ルーメンは三日月形ないし部分日食形をしており、見かけの断面積は大きい有効断面積は小さい。円形の大きな圧ルーメンと小さなバルーン用ルーメンを8の字様に配置すれば周波数特性は改善されるはずである。同じ観点から、3種の5ルーメンのPACの構造も薦められない。図2(3)から類推して、円形のルーメンをなるべく均一に配置しながら多ルーメン化を図るべきである。均一な構造を持つことによって操作性が向上する点も指摘したい⁷⁾。

次に、PAC に使用されている材質はポリ塩化ビニールとポリウレタンの2種である。いずれもプラスチックの基礎材料であるため、使用目的によってその物理特性は大きく変化する。PACの周波数特性に影響を与える物理特性としてはヤング率(曲げ、引張、圧縮)と表面硬さおよび表面の滑らかさである。カテーテルのヤング率については、ポリウレタンの方がポリ塩化ビニールよりより大きい(硬い)と報告されており^{8,9)}、PACについても同様な結果を得ているが⁷⁾、表面硬さと表面の滑らかさについては全くデータがなく、測定も困難である。上の式から明らかなように、ヤング率が大きいほど固有周波数は大きくなり、制動係数は低下するはずであるが、我々の得たヤング率に関する結果は逆にポリ塩化ビニールを使用した場合の周波数特性が高くなっている。材質に依存する成形工程の差やヘパリンコーティングとの関係によって内腔の形状や硬さおよび滑らかさ等の性状が変化するためであろう。操作性や抗血栓性等を考慮して両者を使い分ける必要があるときには、周波数特性にやや差があることに注意すべきである。

固有周波数が限界値付近まで高くなると制動係数が低下し共振現象が顕著になるので共振を抑える対策が不可欠になる。図7は共振を抑圧するための2つの方法を示しているとも解釈できる。1つは Accudynamic[®] や ROSE[®] 等の制動素子を用いる方法で、もう1つは延長チューブや気泡を用いた場合である。Accudynamic[®] の効果は、共振周波数と固有周波数をあまり変えずに共振振幅を低下させる、つまり制動係数のみを上げることを目的に設計されており、図7や表2の結果は概ね満足できる。ただし、ROSE[®] はこの PAC の場合では制動のききすぎである。他方、延長チューブや気泡を用いた場合は共振振幅は低下するが、共振周波数と固有周波数の低下も著しく、制動効果を目的とした使用には不適であるばかりか、臨床使用時の PAC の固有周波数は 8~14 Hz 程度

なので、著しい帯域幅の減少を招く危険がある。なお、Accudynamic[®] の最適点への調整は PAC の種類のみならず組み立てた系によっても異ってくる。上に述べたように延長チューブの接続や気泡の存在が制動効果を持っているからである。組み立てた系の周波数特性をチェックする方法としては、フラッシュデバイスを用いて圧のステップ変化を起こし、リングング波形の減衰特性から固有周波数と制動係数を算出する方法が今のところ唯一の方法である²⁻⁴⁾。簡単には、リングング波形が最も速やかに減衰する点に Accudynamic[®] のノブを調整すればよい。フラッシュデバイスを使用できないときは、圧波形に乗っている小さな振動を防止しながら、波形の切れ味のよい点に調整することになる。

文 献

- 1) 杵淵嘉夫, 鈴木利保, 山崎陽之介他: 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.
- 2) 杵淵嘉夫, 鈴木利保, 山崎陽之介他: カテーテルを用いた圧導出系の振幅と位相の周波数特性. 呼吸と循環 39: 767-777, 1991.
- 3) 笹本 浩, 沖野 遙, 藤咲喜一他: 電気血圧計(その1). 医学のあゆみ 32: 692-697, 1960.
- 4) Geddes, L. A.: The direct and indirect measurement of blood pressure. Year Book Medical Publishers, 1970, pp. 49-66.
- 5) Rutten, A. I. et al.: An assessment of six different pulmonary artery catheters. Crit Care Med 15: 250-255, 1987.
- 6) Gardner, R. M.: Direct blood pressure measurement-dynamic response requirements. Anesthesiology 54: 227-236, 1981.
- 7) 鈴木利保, 杵淵嘉夫, 山崎陽之介他: PAC (pulmonary artery catheter) の物理的な特性と使いやすさの関係. 循環制御 13: 83-88, 1992.
- 8) Stenqvist, O., Currelaru, I., Linder, L. E. et al.: Stiffness of central venous catheters. Acta Anaesthesiol Scand 27: 153-157, 1983.
- 9) Cervera, M., Dolz, M., Herraes, J. V. et al.: Evaluation of the elastic behavior of central venous PVC, polyurethane and silicone catheters. Phys Med Biol 34: 177-183, 1989.

The limits of the frequency characteristics of PACs (pulmonary artery catheters)

Yoshio Kinefuchi, Toshiyasu Suzuki, Kazuhide Takeyama
Yonosuke Yamasaki and Michio Yamamoto

Department of Anesthesiology, School of Medicine, TOKAI University

Measurement of the frequency characteristics of the fluid-filled catheter-manometer system in a deaerated lactated Ringer's solution has revealed that a conventional PAC (7 Fr; 4 lumina; length, 110 cm) has natural frequency of 28.5-41.2 Hz, and a damping coefficient of 0.16-2.2. In other words, the natural frequency is higher by 2-3 times or even more than a system assembled by the conventional clinical procedure, while the damping coefficient is reduced in a similar degree to the latter. These values are mostly consistent with the claimed specifications by the manufacturers and also with the values calculated from dimensions of the PAC; hence, the values obtained are presumably the limits of the frequency characteristics. The limits of the frequency

characteristics is related to the structure of the lumen, and the structure of a thick-wall and a circular cross section proved to have a better frequency characteristics than that of radial cross section partitioned with thin walls. The limits of the frequency characteristics further proved to be related to the materials used, and the PACs made of polyvinyl chloride were found to be superior to those made of polyurethane. The damping devices commercially available proved to exert a satisfactory damping effect, although they lowered the natural frequency slightly. Fitting with an extension tubing and infusion of air have worsened both the natural frequency and the damping coefficient.