

# 右室自由壁インピーダンスによる開心術後右心室機能の評価に関する実験的検討と臨床的意義

八田 光弘\* 野々山 真樹\* 華山 直二\*  
 今牧 瑞浦\* 西中 智博\* 佐藤 志樹\*  
 佐藤 一樹\* 勝間田 敬弘\* 小柳 仁\*

## 要 旨

心筋インピーダンスを用いた開心術後右心室機能の経時的モニタリングとして心筋インピーダンスの有用性について検討した。

〔実験的検討〕 雑種イヌ15頭を用いて、右室自由壁2点間に電極を留置し、そのインピーダンスと心収縮能との相関について検討を加えた。インピーダンスによる右心室収縮能の評価は、各薬物投与、肺動脈絞扼術、心室細動の誘発による、右心自由壁インピーダンスの変化と肺動脈圧、大動脈圧の変化により施行した。各薬物投与と右心室インピーダンス値の変化は、イソプロテレノールの投与により  $5.6 \pm 0.3 \Omega$  より  $14.8 \pm 0.4 \Omega$  に増大し、エピネフリン投与により  $5.5 \pm 0.3 \Omega$  から  $19.6 \pm 0.5 \Omega$  に増大した ( $p < 0.01$ )。一方、肺動脈を絞扼した場合は、 $15 \pm 1.5 \Omega$  より  $8 \pm 1.9 \Omega$  と有意に減少した ( $p < 0.01$ )。

〔臨床的検討〕 僧帽弁置換術後16例に対して、同様に検討したところ、急激な肺動脈圧の上昇に伴い、右心室インピーダンスは著明な低下を示し、心臓ペースング依存症例に対しては、自己右心室インピーダンスが  $20 \Omega$  以上に改善を示した時点で、ペースングを中止し安定した術後経過が得られた。術後右心収縮能と右室自由壁2点間のインピーダンスは良好な相関を有し、右心不全に対する新しい非侵襲的な指標として有用性が示唆された。

**Key words:** 僧帽弁膜症, 肺高血圧症, 右心不全, 僧帽弁置換術

## はじめに

高度肺高血圧症、右心不全を合併した僧帽弁膜症は、術後肺高血圧の残存による右心不全を招来し、術後低心拍出量症候群を呈する重篤な疾患群である<sup>1)~3)</sup>。しかしながら、これらの疾患群に対しての開心術後右心不全の評価は、中心静脈圧、肺動脈圧、心拍出量などの間接的指標に依存しているのが現状であり、右室収縮能を直接的反映する指標とは言いがたい<sup>4)5)</sup>。今回は、右室自由壁心筋内の2点間のインピーダンスに注目して、右室収縮能との相関について実験的及び臨床的に検討したので報告する。

## 対象及び方法

### 1. 実験的検討

雑種イヌ15頭 (体重 10~15 kg) を用いて、ペントバルビタール麻酔下に挿管、人工呼吸下に正中開胸を施行した。

まず、5頭については Young 氏液を注入し摘出した心臓の右心室流出路の2点に (20 mm 間隔) 電極を刺入し、 $7 \mu A$ , 80 KHz の交流電流し、高周波増幅器、整流回路を直列に置く回路に接続した (Fig. 1)。次に、機械的に心拍動を擬似する目的で電極2点間において 2 mm の接近運動を反復させ、2点間のインピーダンスの振幅 (以下インピーダンス) を測定した。2点間のインピーダンスは距離が接近するにしたがい低下し、離れるにしたがい増大した (Fig. 2)。したがって、その振幅は2点間の距離の変化に対応するものと考え

\*東京女子医科大学附属日本心臓血圧研究所循環器外科

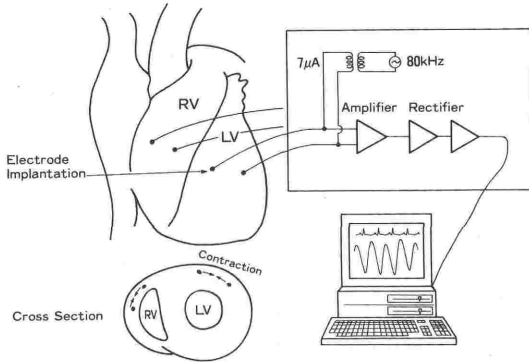


Fig. 1 Electrodes implantation and method of measurement of cardiac impedance

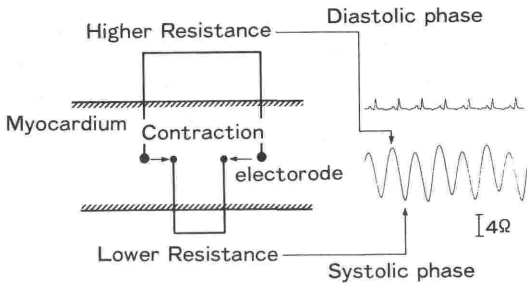


Fig. 2 A theory of measuring impedance

えられた。また、2 mm の接近運動を 4 mm に増加してその振幅の変化について検討したところ、 $4.5 \pm 0.5 \Omega$  より  $6.8 \pm 0.8 \Omega$  に有意な振幅の増幅を認めた ( $p < 0.01$ )。

次に雑種イヌ10頭を用いて、正中開胸後心臓を露出し、同様に左心室及び右心室自由壁に2点の電極を埋め込み、心拍動下でのインピーダンスの変化と右心室の心収縮能との相関について検討を加えた。植え込みに使用した電極は、一時的体外ペースティング用針電極(松田医科工業社製50B233号)を用い、心表面に露出することなく心筋内に完全に埋没するように留置し、5-0プロリンにて固定した。

インピーダンスによる右心室収縮能の評価は、1) イソプロテレンロール (0.1 mg/kg/min), 2) 0.1%エピネフリン 0.3 ml の各薬剤投与, 3) 肺動脈絞扼術, 4) 心室細動の誘発を行い、右心自由壁インピーダンスと肺動脈圧、大動脈圧の各圧測定及び主肺動脈に設置した電磁流量計による肺動脈血流量を同時に測定した。

なお、結果は5回以上の測定結果の平均値を用

い、Mean±sd として示した。統計学的有意差の検定は unpaired Student's t-test にて行い、危険率5%以下を有意とした。

### 結果

各薬物投与による血行動態と右心室筋インピーダンスの変化を検討した結果、イソプロテレンロール (0.1  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$  DIV) の投与により大動脈圧収縮期圧は 90 mmHg から 110 mmHg に上昇し、心拍数は 100/min. より 140/min と増加し、右心系心拍出量は  $0.98 \pm 0.08$  l/min より、 $1.66 \pm 0.07$  l/min. に増加した。この心筋収縮力の増大にしたがい、右心室自由壁のインピーダンス値の振幅も  $5.6 \pm 0.3 \Omega$  より  $14.8 \pm 0.4 \Omega$  に増大を示した ( $p < 0.01$ ) (Fig. 3)。また、0.1%エピネフリン 0.3 ml の静脈内投与においても同様に大動脈圧は 110 mmHg より 180 mmHg 肺動脈圧は 18 mmHg から 41 mmHg へと著明な上昇を認め、右心系心拍出量は  $1.10 \pm 0.3$  l/min. より  $1.88 \pm 0.4$  l/min. と増加した。これに伴い、インピーダンスは  $5.5 \pm 0.3 \Omega$  より  $19.6 \pm 0.5 \Omega$  に増大傾向を認めた ( $p < 0.01$ ) (Fig. 4)。一方、肺動脈を絞扼し、平均主肺動脈圧が 16 mmHg より 30

### Isoproterenol Infusion

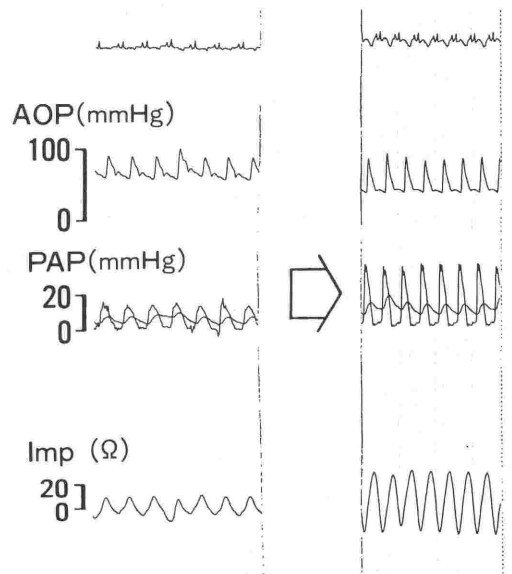


Fig. 3 Isoproterenol infusion and impedance change

**Epinephrine Infusion**

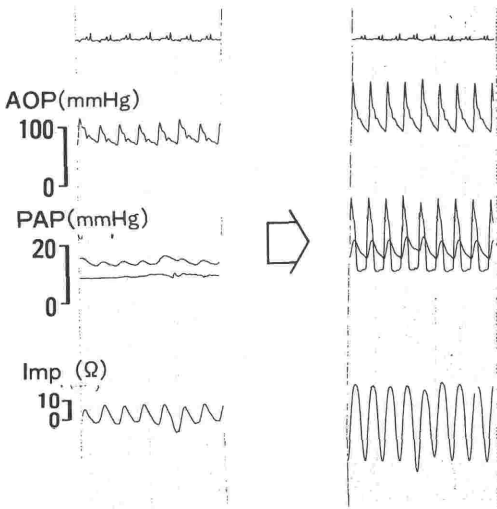


Fig. 4 Epinephrine infusion and impedance change

mmHg と上昇させ、右心系心拍出量は  $1.21 \pm 0.19$  より  $0.51 \pm 0.2$  l/min. と減少した。このような右心室後方圧負荷が増大した血行動態下での右室インピーダンス値は  $15 \pm 1.5 \Omega$  より  $8 \pm 1.9 \Omega$  と有意に減少した ( $p < 0.01$ ) (Fig. 5)。また心室細動を誘発した場合には右室自由壁インピーダンスは  $8 \pm 0.3 \Omega$  より  $1 \pm 0.2 \Omega$  と著明な減少を示し

**PA Banding**

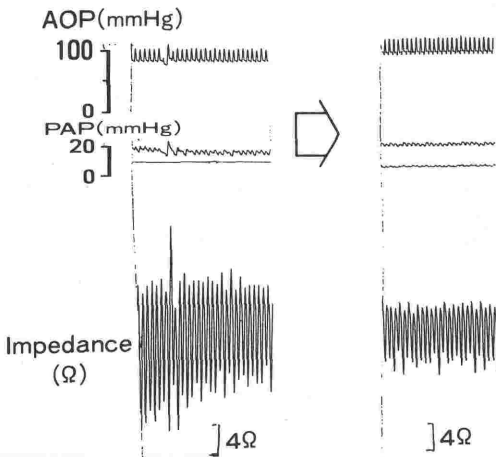


Fig. 5 Pulmonary banding and impedance change

**Ventricular fibrillation**

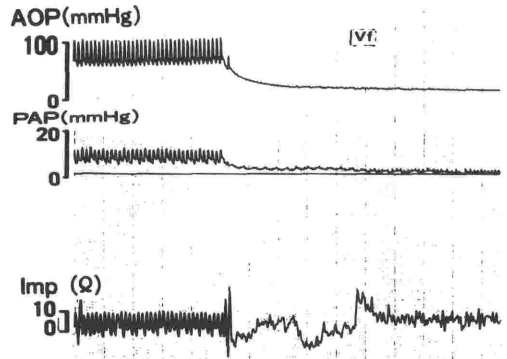


Fig. 6 Ventricular fibrillation and impedance change

た ( $p < 0.01$ ) (Fig. 6)。

これらの実験結果から心筋2点間のインピーダンスは収縮に伴う2点間の距離の変化を有意に反映する指標としての可能性が示唆された。

2. 臨床的検討

実験結果に基づいて、僧帽弁膜症に対する弁置換術後患者16例について、開心術中に右室自由壁に使用後抜去可能な心室ペースング針電極を2点に留置し、体外に誘導した電極の他端を術後ICUにおいてインピーダンス測定回路 (Fig. 1) と接続し、インピーダンスを経時的に測定した。

症例S.K.は、呼吸器からの離脱時、肺動脈圧が  $69/26(43)$  Hg から  $90/31(51)$  mmHg へと急激な上昇を示し、この時のインピーダンスは  $40.3 \pm 3.2 \Omega$  より  $1 \pm 0.3 \Omega$  と著明な低下を示した ( $p < 0.01$ ) (Fig. 7)。この一過性の急激な肺動脈圧の上昇に対して、ニトログリセリン (8 ml) の静脈内投与を行ったところ、肺動脈圧は  $68$  mmHg と低下し、これに伴い、インピーダンスも  $34 \Omega$  と増大、Swan-Ganz カテーテルによる心係数値も  $1.96$  l/m<sup>2</sup> から  $2.34$  l/m<sup>2</sup> と著明な改善を示した。本症例の呼吸器離脱に際しては、呼吸器離脱時のインピーダンスが自発呼吸にて  $30 \Omega$  以上に改善した術後6日目に抜管が可能であり、心係数の低下も認めず、高度肺高血圧症による右心不全の治療効果及び改善度の判定に有用であった。

Case 1 S.K. MS+PH (POST MVR)

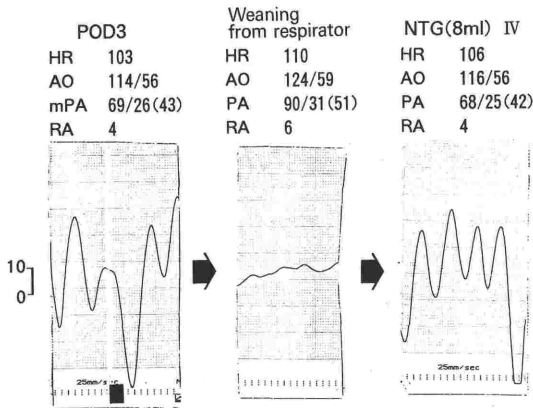


Fig. 7 Case 1. S.K.

Significant elevation of pulmonary artery pressure was seen when respirator was discontinued. The impedance of right ventricle was significantly decreased in accordance with pulmonary hypertension. Subsequently, nitroglycerine was infused. The impedance was increased in according to decreasing pulmonary artery pressure.

また、症例 S. K. と術後正常肺動脈圧を示した症例 N. S. における術後肺動脈圧とインピーダンス

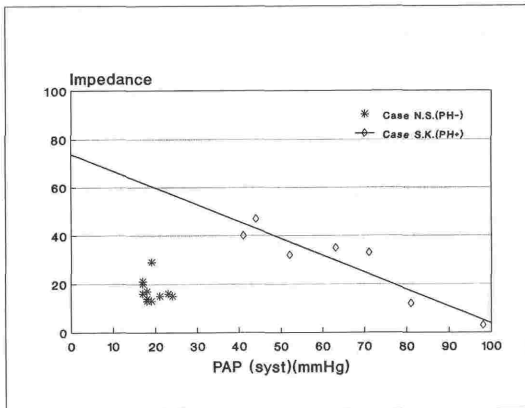


Fig. 8 Correlation between pulmonary artery pressure and impedance. No pulmonary hypertension was seen in Case N. S. and significant pulmonary hypertension was seen in Case S. K. Although no significant change of impedance was seen in N. S., Significant correlation between impedance and pulmonary artery pressure was observed in S. K.

スの変化を比較すると、症例 S. K. については肺動脈圧の増加にしたがいインピーダンスの低下が顕著で有意な相関を認めた ( $Y=0.78 \times +79.1$ ,  $R=0.96$ ) が症例 N. S. では肺動脈圧は正常範囲にとどまり、これに伴いインピーダンスも著明な変化を認めず、有意な相関は得られなかった (Fig. 8).

また、術後右心不全及び自己心拍数の低下から一時的ペースングを施行した症例 S. I. は、ペースング下でのインピーダンス ( $\Omega$ ) は  $40 \pm 1.2 \Omega$  と良好であったのに対し、ペースング中止時には、 $3 \pm 1.6 \Omega$  と著明な低下を示した。本症例は、心臓ペースングの中止にともなって心拍出量、尿量の減少を認めたため、一時的に心臓ペースング依存状態となったが、術後11日後のインピーダンス測定において、自己右心室インピーダンスが 20

Case S.I. MR+PH

— Effect of Cardiac pacing and Impedance —

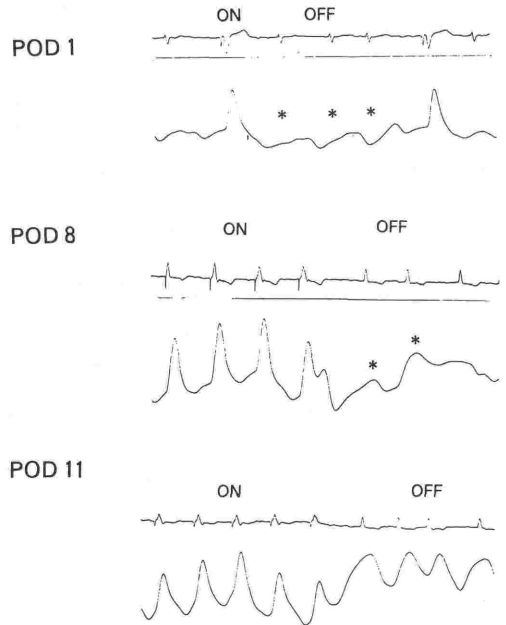


Fig. 9 Effect of cardiac pacing and right ventricular impedance.

Right ventricular function was assisted with cardiac pacing by 8 days after mitral valve replacement. On 11th post operative day, the impedance was increased at discontinuance of pacing. Stable right ventricular function was observed.

$\Omega$  以上に改善を示した。この時点で、ペーシングを中止しその後は安定した術後経過が得られた (Fig. 9)。

このような臨床的検討から、僧帽弁膜症術後右心収縮能と右室自由壁 2 点間のインピーダンスは極めて良好な相関が得られ、右心不全に対する開心術後管理上の新しい非侵襲的な指標として有用であると考えられた。

## 考 察

心室収縮機能は、1970年代より Swan-Ganz カテーテル<sup>6)7)</sup>、超音波断層撮影<sup>8)</sup>、コンダクタンスカテーテル<sup>9)</sup>などの左心室収縮能の評価方法が確立され、開心術後の心機能評価法として定着し臨床的にも開心術後心不全の病態の診断と治療に大きな役割を果たしてきた。しかしながら、右心室は左心室に比較し、解剖生理学的により複雑な心腔であり、右室筋肉層のらせん状の収縮による中隔側へのふいご様運動の収縮様式を示すものである。したがって、現在のところこれに対する適切な評価方法は未だに確立されていないために<sup>10)11)</sup>、経時的な右心機能の臨床的評価は、中心静脈圧などの間接的な圧力指標に依存している<sup>19)</sup>。

Kay らは Swan-Ganz カテーテルを用いて、温度センサーの温度差の時間的なずれに着目し、拡張末期容積と収縮末期容積を算出することにより、右室駆出率を求める方法を考案した<sup>12)16)</sup>。しかしながら、この方法は理論的にも心房細動時における測定値の信頼度は低く、右心不全を合併した僧帽弁膜症例は心房細動などの不整脈の合併頻度が高いことから、開心術後の右心機能のモニタリングとしては十分な信頼性が得られているとは言い難い。

インピーダンスの循環器領域への応用に関して、1953年 Rushmer は、左心室腔短軸径の測定に対してインピーダンスの有用性をすでに検討している。左室内膜の対側 2 点間に電極を設置し、血液を媒介したこのインピーダンスは収縮期に低下し、拡張期に増大した。その振幅により左心室腔の短軸径の測定を試みたところ、心拍動下の心筋インピーダンスは 2 点間の距離の変化に対応した。また、2 点間のインピーダンスの絶対値は血液の性状により導電率が異なるために必ずしも心

室腔の容積測定には適さないものの、この変化は、心筋 2 点間の距離測定の上では極めて鋭敏であり、左心収縮メカニズムの解析に有用であると述べている<sup>17)</sup>。Geddes らは左室心尖部と心基部の心内膜に電極を植え込み、電極間のインピーダンスを内腔の血液を媒介として測定し、血液特有の導電率を補正することにより左室内径の測定が可能とするものである<sup>18)</sup>。これは、心房細動時の微細な左室腔径の変化にも対応可能であるとされ、このように、均一な環境下でのインピーダンス測定による実測距離の測定については、既に信頼性が得られている。

さらに、1983年、Baas らはインピーダンスの概念を改良し、心腔を血液を含む 1 つの導電体と考え、8 個の電極を心腔内に留置するコンダクタンスカテーテルにより、左室容積の測定法を考案した<sup>9)</sup>。

今回われわれが用いた方法は、前述の血液を媒体とする距離測定とは異なり、心筋のみを媒介する 2 点間インピーダンスの測定であり、このインピーダンスによる距離の変化を求め右室心収縮力の 1 つの指標と考えるものである。心室筋の収縮は左心室では単軸径の縮小方向に収縮するものの、右心室では心尖部長軸方向への直線的な収縮を示すために、この自由壁 2 点間距離の変化は右室の場合より収縮性を反映すると考えられる<sup>11)</sup>。

今回の実験的検討では、使用電流を  $7\mu\text{A}$ 、80 KHz と微小電流とし、心室細動の誘発を回避した他、抜去可能な電極を用いることにより臨床的使用を可能とした。また、電極を留置する位置は、右室流出部筋層と平行とし、その間隔を一定にすることで測定精度の向上に努めた。これは、右室流入部と流出部では収縮様式が異なるために、より右室収縮を反映する流出部を選択したものである。このような一定条件下において右室心筋収縮による距離の変化とインピーダンスは有意な相関を示し、この経時的な測定は右室前、後負荷に対する右室収縮能の経時的なモニタリングとして有用な指標となる可能性が示唆された。

今回用いたインピーダンスによる心機能評価の今後の課題としては、1) 右室心筋の壁厚、2) 心腔内の血液の導電率、3) 電極 2 点間の距離の違い、4) 電極固定部の摩擦などにより各症例で振幅の絶対値が異なる可能性を有するために、各症

例間での評価が容易でない点があげられる。しかしながら、同一症例における経時的かつ非侵襲的なモニタリングとしての有用性は充分考慮されると考えられた。また、術後測定可能期間に関しては、Rushmerらは動物実験において、心室内膜に留置した電極は挿入後2週間の測定が可能であると述べており、今回の臨床検討においても、術後3週間の測定でもインピーダンス値の変動は認められず、術後急性期の指標として十分な有用性が認められた<sup>17)</sup>。

また、今後、電極部分の技術的改良及び右室心筋の導電率補正法などが解明されれば、本法の臨床応用範囲はさらに広がるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 酒匂伸一郎, 岡 龍弘, 下山恵美・ほか: 肺高血圧症での急激な右心負荷による心不全. 麻酔 38-8: 1076-1082, 1989.
- 2) Vincent, J. L., Reuse, C., Frank, N., et al.: Right ventricular dysfunction in septic shock: assessment by measurements of right ventricular technique. Acta Anaesthesiol Scand 33:34-38, 1989.
- 3) Joseph, P. F., Leonard, H. B., Joshua, W.: Right ventricular ejection fraction: an indicator of increased mortality in patients with congestive heart failure associated with coronary artery disease. JACC 2:217-224, 1983.
- 4) Myron, L. B., William, S. H., Gerald, P. M.: Right and left ventricular geometry: adjustments during acute respiratory failure. Crit Care Med 7:509-519, 1979.
- 5) Lange, P. E., Onnasch, D., Farr, F. L., et al.: Analysis of left and right ventricular size and shape, as determined from human casts. Description of the method and its validation. Eur J Cardio 8:431-448, 1978.
- 6) Calvin, J. E., Driedger, A. A., Sibbald, W. J.: Does the pulmonary capillary wedge pressure predict left ventricular preload in critically ill patients? Crit Care Med 9:437-443, 1981.
- 7) Rapaport, E.: Usefulness and limitations of thermal washout technics in ventricular volume measurement. Am J Cardiol 18:226-234, 1966.
- 8) Rushmer, R. F., Franklin, D. L., Ellis, R.: Left ventricular dimensions recorded by sonocardiometry. Circ Res 4:684-688, 1956.
- 9) Baan, J., Velde, E. T., Burin, H. G., et al.: Continuous measurement of left ventricular volume in animals and humans by conductance catheter. Circulation 66:11-227, 1992.
- 10) Hurford, W. E., Zapol, W. M.: The right ventricle and critical illness: a view of anatomy, physiology, and clinical evaluation of its function. Intensive Care Med 14:448-457, 1988.
- 11) Rushmer, R. F., Crystal, D. K., Wagner, C.: The functional anatomy of ventricular contraction. Circ Res 1:162-170, 1953.
- 12) Kay, H. R., Afshari, M., Brash, P. et al.: Measurement of Ejection by thermal dilution techniques. J Surg Res 34:337-346, 1983.
- 13) Urban, P., Scheidegger, D., Gabathuler, J., et al.: Thermodilution determination of right ventricular volume and ejection fraction: A comparison with biplane angiography. Crit Care Med 15:652-655, 1987.
- 14) Bing, R. J., Heimbecker, R., Falholt, W.: An Estimation of the residual volume of blood in the right ventricle of normal and diseased human hearts in vivo. Am J Med 42:483-502, 1951.
- 15) Folsie, R., Braunwald, E.: Determination of fraction of left ventricular volume ejected per beat and of ventricular enddiastolic and residual volumes. Circulation 15:674-685, 1962.
- 16) Holt, J. P.: Estimation of the residual volume of the ventricle of the dogs heart by two indicator dilution technics. Circ Res 4:187-195, 1956.
- 17) Rushmer, R. F., Crystal, D., Wagner, C., et al.: Intracardiac impedance plethysmography. Am J Physiol 174:171-174, 1953.
- 18) Geddes, L. A., Hoff, H. E., Mello, A.: The development and calibration of a method for the continuous measurement of stroke-volume in the experimental animal. Jap Heart J 7:556-565, 1966.
- 19) Sibbald, W. J., Driedger, A. A.: Right ventricular function in acute atates: Pathophysiologic considerations. Criti Care Med 11:339-345, 1983.

## Monitoring of right ventricular function using cardiac impedance.

Mitsuhiro Hachida, Masaki Nonoyama, Naoji Hanayama  
Mizuho Imamaki, Tomohiro Nishinaka, Motoki Satou  
Kazuki Satou, Takahiro Katsumata and Hitoshi Koyanagi

Department of Cardiovascular Surgery, The Heart Institute of Japan,  
Tokyo Women's Medical College, Tokyo, Japan

Although right ventricular failure after open heart surgery was a crucial complication, there is no appropriate indicator to directly assess right ventricular function. In this study, we evaluated the correlation between right ventricular impedance and right ventricular function and investigated the efficacy of cardiac impedance as an indicator for right ventricular function. In the experimental study, 15 mongrel dogs were used. Two electrodes were implanted into the right ventricular free wall and current (8 KHz, 7  $\mu$ A) were conducted between the electrodes in various conditions. When epinephrine, isoproterenol was infused, the im-

pedance was significantly increased. And impedance was significantly decreased with pulmonary banding and induction of ventricular fibrillation. In clinical study, the impedance of right ventricle free wall was measured in 16 patients after mitral valve replacement. The patient with right ventricular failure due to postoperative pulmonary hypertension revealed a significant decrease of cardiac impedance in correlation to the measurement of right ventricular impedance was a useful indicator to evaluate right ventricular function postoperatively.