

臨床例の左室容積および容積曲線計測, 左室圧容積関係評価におけるコンダクタンスカテーテル法の有用性

Conductance catheter for determining left ventricular volume and end-systolic pressure-volume relations: Its clinical application

赤石 誠
松原 隆
阿部 純久
後藤 信哉
横塚 仁
半田俊之介

Makoto AKAISHI
Takashi MATSUBARA
Sumihisa ABE
Shinya GOTO
Hitoshi YOKOZUKA
Shunnosuke HANDA

Summary

In this study, the clinical usefulness of the conductance catheter technique was assessed. The end-systolic pressure-volume relations (ESPVR) measured with the increase and decrease in the preload were also compared.

Fourteen patients with various heart diseases who underwent diagnostic cardiac catheterization were studied. Using a right atrial pacing catheter, 8 electrical stimuli delivered at a fixed rate of 800 msec were followed by a single early stimulus of 500 msec coupling interval, resulting in premature atrial contraction and post-extrasystolic potentiation (PESP). Left ventricular (LV) volume was measured by 2 methods; namely, the conductance catheter technique and single-plane left ventriculography (LVG). ESPVR was obtained either with the inferior vena caval occlusion induced by balloon inflation, or with the rapid transfusion of saline with electrical resistance identical to the blood volume in the right atrium.

The LV volume obtained with the conductance catheter technique (V_{CON}) was correlated with the LV volume as obtained by LVG (V_{LVG}) (end-diastolic volume, $V_{CON}=1.09V_{LVG}-4.66$, $r=0.95$; end-systolic volume, $V_{CON}=1.42V_{LVG}-18.2$, $r=0.89$).

There was correlation of the change in LV volume (ΔV) induced by PESP between the 2 methods (end-diastolic volume, $\Delta V_{CON}=0.52\Delta V_{LVG}+0.94$, $r=0.76$; end-systolic volume, $\Delta V_{CON}=0.42\Delta V_{LVG}-4.78$, $r=0.72$), suggesting that the change in LV volume estimated by the conductance catheter technique was smaller than that estimated by LVG. The LV volume curves were similar.

慶應義塾大学医学部 呼吸循環器内科
東京都新宿区信濃町 35 (〒160)

Cardiopulmonary Division, Department of Medicine,
Keio University School of Medicine, Shinanomachi
35, Shinjuku-ku, Tokyo 160

Received for publication April 16, 1991; accepted October 2, 1991 (Ref. No. 38-PS65)

The change in conductance of each segment of the conductance catheter was not necessarily identical directionally to the change in total conductance, suggesting the cause of underestimations of LV volume change. The slope of ESPVR was steeper when measured with inferior vena caval occlusion ($6.3 \pm 5.2 \text{ mmHg} \cdot \text{ml}/\text{m}^2$) than with rapid volume transfusion ($2.5 \pm 1.9 \text{ mmHg} \cdot \text{ml}/\text{m}^2$).

Although the conductance catheter technique was a clinically useful method for estimating LV volume, provided the proper calibration was performed, underestimations of LV volume changes were noted with the use of the conductance catheter which was related to variations of changes in conductance of each segment of the catheter. Furthermore, in clinical cases, ESPVR measured with conductance catheter may vary depending on the method used for changing the preload of the left ventricle.

Key words

Conductance catheter Left ventricular volume Human End-systolic pressure-volume relation

はじめに

従来、左室の容積を測定する手段としては左室造影法が一般的で、左室駆出率の算出のみならず、左室容積曲線、左室圧容積関係の解析に用いられてきた。最近普及したコンダクタンスカテーテル法¹⁻³⁾は容易、かつ連続的に左室容積測定を施行することができるので、臨床例の収縮末期圧容積関係などの解析に応用されつつある^{4,5)}。収縮末期圧容積関係の解析には下大静脈の閉塞により前負荷を減少させる方法が一般的である⁵⁾。しかし前負荷を急速に減少させた場合と増加させた場合、あるいは血管抵抗が異なる場合で得られる収縮末期圧容積関係が同等であるかについては疑義^{6,7)}があり、コンダクタンスカテーテル法を用いた収縮末期圧容積関係を臨床応用する際には検討を要する課題である。さらに臨床例でコンダクタンスカテーテル法と左室造影法を比較し、詳細に検討した研究は少ない。

本研究の目的はコンダクタンスカテーテル法で求めた左室容積と、左室造影法で求めた左室容積を様々な条件下で比較し、コンダクタンスカテーテル法の得失を明らかにし、加えて負荷を変化させる方法の相違が収縮末期圧容積関係をどのように修飾するかを明らかにすることである。

方 法

臨床診断上心臓カテーテル検査を心要とした各

種心疾患患者 14 例 (男性 12, 女性 2, 平均年齢 50.3 ± 10.0 歳) を対象とした。疾患の内訳は拡張型心筋症 2 例, 陳旧性心筋梗塞 6 例, 狭心症 3 例, 大動脈弁閉鎖不全症 1 例, 僧帽弁閉鎖不全症 1 例, 僧帽弁狭窄症 1 例である。

13 例で右房内にペーシングカテーテルを留置し、間隔 800 msec の 8 回の基本心房刺激と、それに引き続く連結期 500 msec の早期心房刺激を加えた。この方法により 75/分の心房調律と、それに引き続く心房性期外収縮を作製した。期外収縮後の洞性拍は期外収縮後収縮増強現象を示し、左室容積は先行心房調律拍とは異なる。この方法は十分な再現性を有し、左室容積の変化を 2 つの測定法で対比する場合には有用である。

左室造影法

左室造影は右前斜位 30 度で行ない、7 または 10 インチの image intensifier を用いて毎秒 50 フレームで撮影した。コントロール製画像解析装置 MIPRON を用いて得られた画像から Simpson 法を用いて左室容積を計算した。3 例ではフレームごとに左室造影像をトレースし左室容積曲線を作製した。左室造影法の左室容積に対する信頼性は過去にクレイモデル^{8,9)}を用いて様々な点から検討されてきた。とはいえ、この方法はあくまでもその投影画像を観察しているのみであり、胸腔内での位置や角度により算出される容積は変動する。したがってコンダクタンスカテーテル法と対比させる上に左室造影法による左室容積を用いる

妥当性は十分に考慮されねばならない。ましてや陳旧性心筋梗塞症例の一方左室造影から得られた左室容積は、理論上、左室容積を比較する手段としては必ずしも妥当ではない可能性もある。しかし、一方左室造影法に基づく左室容積から計算された左室駆出率が、心筋梗塞症の既往を有すると有しないとにかかわらず、冠動脈硬化症の予後をよく反映するという事実¹⁰⁾から考えても、日常で用いられている一方左室造影法は陳旧性心筋梗塞症において臨床上の重要な意味を持ち、その左室容積値も心室機能を反映していることは間違いない。そこで本研究では、コンダクタンスカテーテル法による左室容積と、左室造影法による左室容積を対応させた。

コンダクタンスカテーテル法

電極間 9 mm のピッグテイル型コンダクタンスカテーテルを左室内へ逆行性に挿入、カテーテル先端を心尖部に進め留置し、期外収縮がでないことを確認した。さらにカテーテルの内腔を通じて 2F のミラー製カテ先トランスデューサーを左室内に挿入した。コンダクタンス [G(t)] の変化をレイコム製 Σ5 を用いて測定し、AD 変換後、左室圧とともに PC9801RX に記録した。

コンダクタンスカテーテル法で得られる左室容積 V_{CON} は次式で表わされる。

$$V_{CON} = 1/\alpha \cdot [G(t) \cdot L^2 \cdot \rho + \alpha \cdot Vc]$$

ここで α は係数、G(t) は左室のコンダクタンス、L は電極間の距離、 ρ は血液の抵抗率、 $\alpha \cdot Vc$ は parallel conductance volume (Vc) である。

レイコム製 Σ5 は $G(t) \cdot L^2 \cdot \rho$ を出力する。この G(t) はカテーテルの 5 つの分節の総和から成立しているが、それぞれの分節の重みづけは一樣ではない。そこで各分節ごとの $G(t) \cdot L^2 \cdot \rho$ を測定し、左室容積変化にこの分節の変化がどのように対応しているかも検討した。

α の算出

α は熱希釈法により求めた心拍出量を心拍数で除し、一回拍出量 (SV_{thermo}) を算出した。この一回拍出量とコンダクタンスカテーテル法で求めた

一回拍出量の比率を α として計算した⁴⁾。なお左室逆流性疾患の 2 例は左室造影法で求めた一回拍出量を用いた。

$$\alpha = [G(t_{ed}) \cdot L^2 \cdot \rho - G(t_{es}) \cdot L^2 \cdot \rho] / SV_{thermo}$$

ここで t_{ed} は拡張末期、 t_{es} は収縮末期である。

抵抗率 (ρ) の測定

血液を 5 ml 採取してキュベットに入れ、レイコム製 Σ5 を用いて測定した。この測定は左室容積測定開始前に施行し、左室容積測定の定数として用いた。 ρ の変動を確認するために計測終了後に再び ρ を測定した。

Vc の算出

5-10 ml の 10% 食塩水を肺動脈主幹より注入すると、左室内圧は変化せずに G(t) が増加する。各心拍ごとの最大値と最小値を求め、最大値を横軸に最小値を縦軸にして、XY 座標上に展開し、一回帰した。その傾き (m) と y 切片 (b) から $Vc = b/(1-m)$ により Vc を算出した。

収縮末期圧容積関係

下大静脈にバルーンカテーテルを横隔膜直下に留置し、呼期終末で呼吸を止めた上でバルーンを膨張させた。この操作により左室圧が 15 mmHg 以上低下した症例 (7 例) について左室圧容積関係を解析した。ついで右房にアンギオパーマカテーテルを留置し、150 ml の血液と抵抗率が同じに設定された生理的食塩水、ブドウ糖溶液の混合液を 15 秒間で注入し、連続的に左室圧容積関係を解析した。

統計

統計は最小自乗法を用いて一回帰し、相関を求めた。また平均値の差の検定は Student's t-test を使用した。

結 果

α , ρ , $\alpha \cdot Vc$

α は 0.487 ± 0.234 、検査直前の ρ は 126 ± 23 cm/s、検査直後の ρ は 144 ± 23 cm/s であった。また $\alpha \cdot Vc$ は 130.8 ± 44.9 ml であった。この $\alpha \cdot Vc$ を求める時に得られた一回帰式の直線

相関は $r=0.97\pm 0.02$ であった. よって補正された parallel conductance volume は平均 427.7 ml であった. α の逆数はコンダクタンスカテーテル

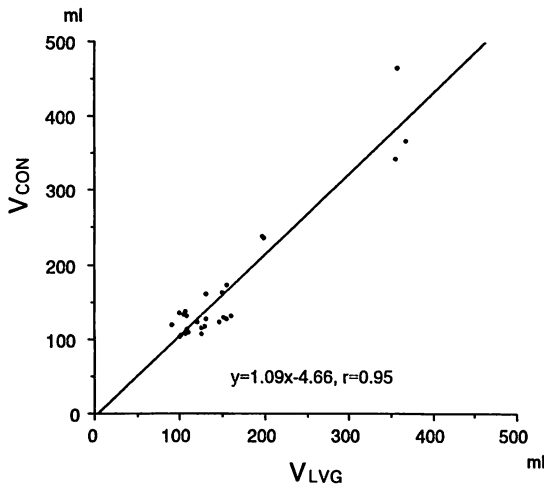


Fig. 1. Correlation of left ventricular end-diastolic volumes estimated by conductance catheter technique (V_{CON}) and left ventriculography (V_{LVG}).

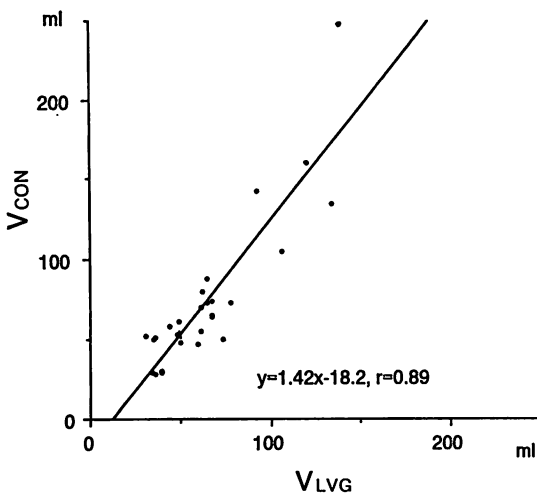


Fig. 2. Correlation of left ventricular end-systolic volumes estimated by conductance catheter technique (V_{CON}) and left ventriculography (V_{LVG}).

法で得られた容積の増幅の係数となる. この $1/\alpha$ は左室拡張末期容積が大となるほど大きくなる傾向を示した ($r=0.54, p<0.05$).

左室拡張末期容積と左室収縮末期容積

左室造影法とコンダクタンスカテーテル法で求めた左室容積を, Figs. 1, 2 に左室拡張末期, 収縮末期に分けて示した. 両者の方法で求めた拡張末期容積の相関は $r=0.95$ で, その一次回帰直線の傾きもほぼ 1 で, Y 軸切片も 0 に近かった. 両者の方法で求めた収縮末期容積の相関も良好 ($r=0.89$) であったが, その傾きは拡張末期容積とは異なっていた.

期外収縮後収縮増強に伴う左室容積の変化

期外収縮直前と直後の洞性拍における左室容積の変化 (ΔV) は, 左室造影法 (V_{LVG}) とコンダクタンスカテーテル法 (V_{CON}) で相関した (拡張末期容積; $\Delta V_{CON}=0.52\Delta V_{LVG}+0.94, r=0.76$, 収縮末期

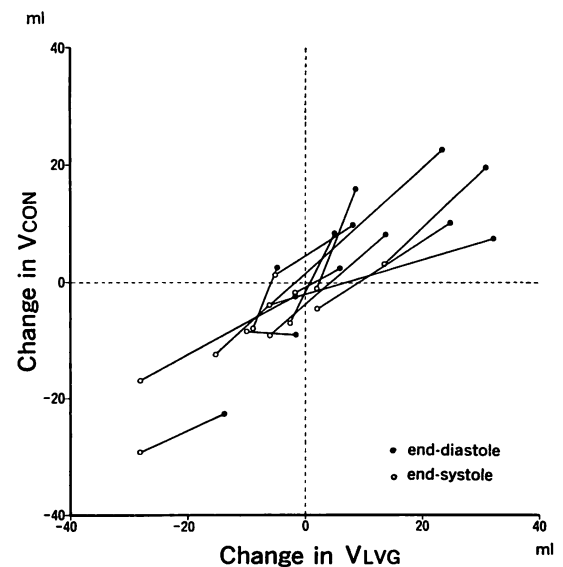


Fig. 3. Correlation of the changes in left ventricular volume by post-extrasystolic potentiation estimated by conductance catheter technique (change in V_{CON}) and left ventriculography (change in V_{LVG}).

Lines represent individual cases.

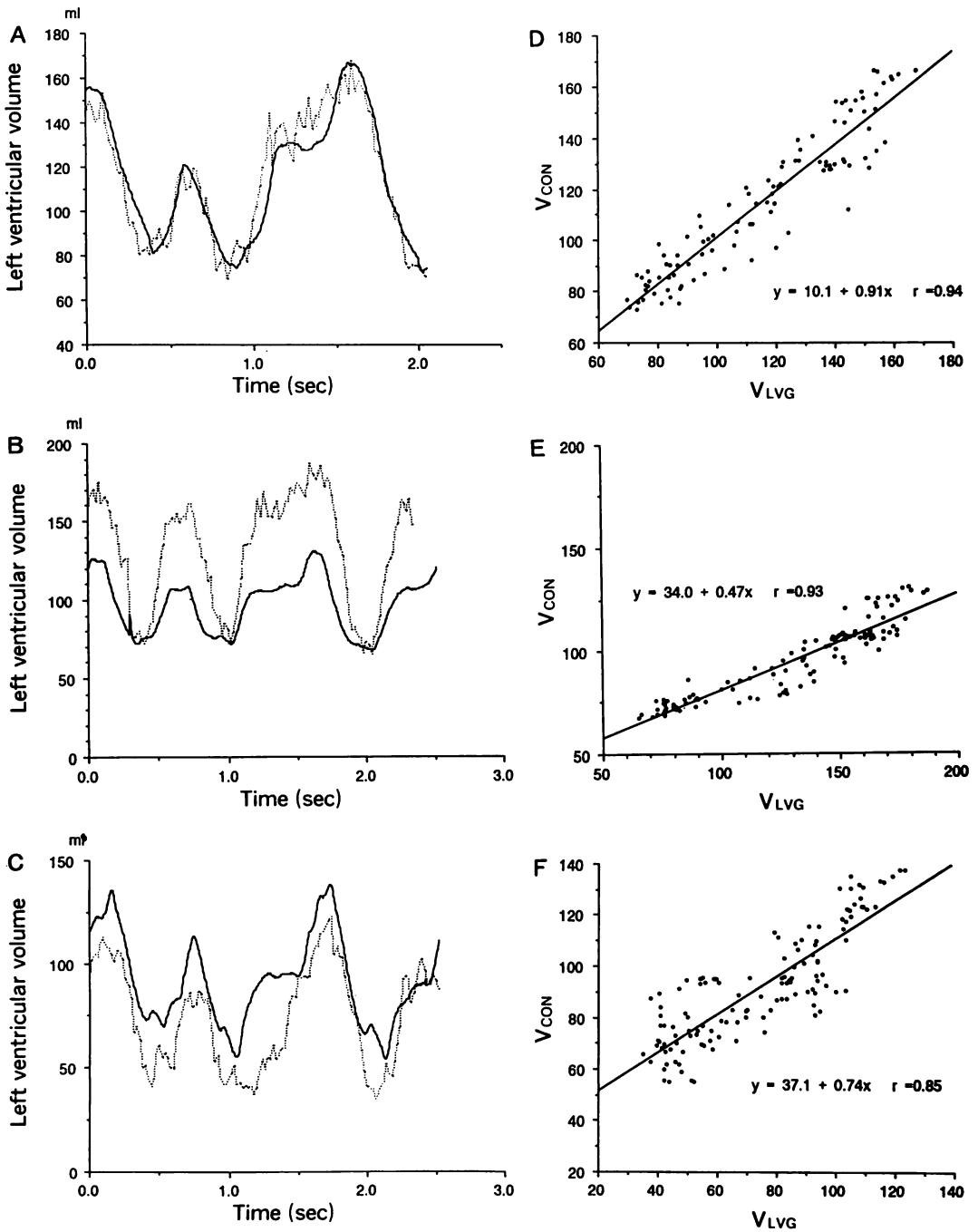


Fig. 4. Left ventricular volume curves of 3 patients (left panels: A, B and C) and correlation of instantaneous left ventricular volumes estimated by conductance catheter technique (V_{CON}) and left ventriculography (V_{LVG}) (right panels: D, E and F).

Solid lines represent V_{CON} and dashed lines represent V_{LVG} .

容積; $\Delta V_{CON} = 0.42 \Delta V_{LVG} - 4.78$, $r = 0.72$). しかし, その一次回帰式の傾きは 0.5 前後で, 左室造影法に比べ, コンダクタンスカテーテル法の方がその変化を小さく評価することが示された. Fig. 3 に容積の変化を左室造影法とコンダクタンスカテーテル法で対比した. この図では各症例をそれぞれ直線で結んで示している. 直線の多くは原点の近傍を通っており, 左室造影法とコンダクタンスカテーテル法は症例ごとにはよく対応していることが分かる.

Fig. 4 の左図は対象のうちから無作為に選んだ 3 例の左室造影法と, コンダクタンスカテーテル法で得られた左室容積曲線を重ね合わせて描いたものである. 両者は相似形であるが, その絶対値の変化量はコンダクタンスカテーテル法の方が小さくなっている. 両者を XY 座標に展開し相関をみると, Fig. 4 の右図のごとくになった. 両者はよく対応しているが, その一次回帰の傾きは必ずしも 1 ではない.

Fig. 5 に, 期外収縮を間入させることにより左室容積を変化させた場合, コンダクタンスカテーテルの分節ごとのコンダクタンス出力の変化を示

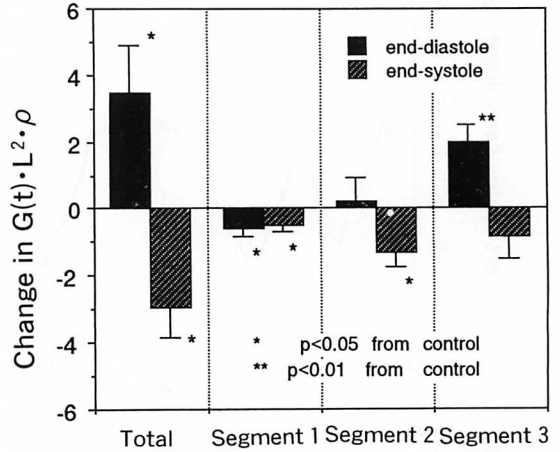


Fig. 5. Change in the output of conductance catheter [$G(t) \cdot L^2 \cdot \rho$] by post-extrasystolic potentiation.

“Total” represents the total output of conductance catheter. “Segments 1, 2 and 3” represent the output of the segments from the apex to the base. Because some of the data for segments 4 and 5 were excluded since regional pressure volume loop showed clockwise rotation, only 3 segments are presented in this figure.

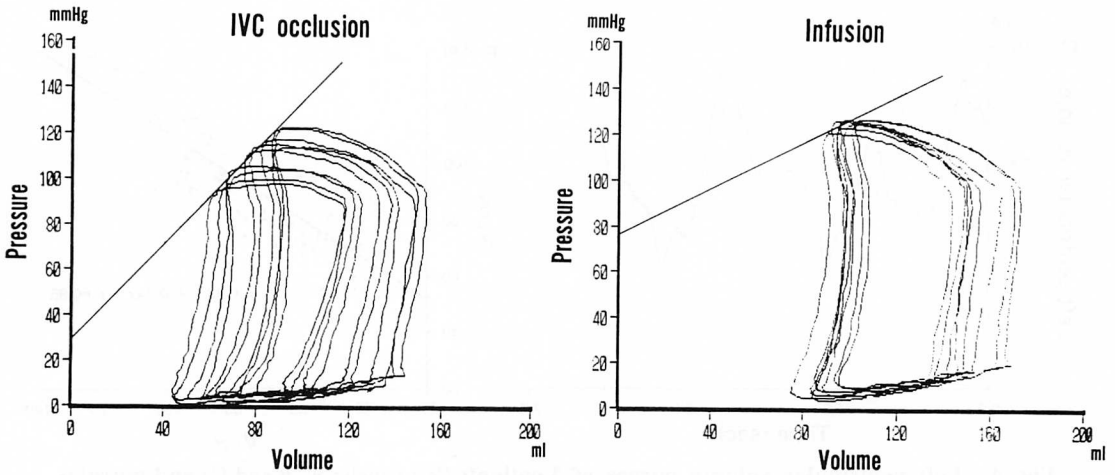


Fig. 6. Pressure-volume relations of a representative case.

Pressure-volume relations during inferior vena caval occlusion are shown in the left panel and those during rapid right atrial infusion in the right panel.

した。拡張末期の分節ごとのコンダクタンス出力の変化は、心尖部に近い分節である V1 では、左室全体のコンダクタンス出力の変化が増加しているにもかかわらず、減少を示した。これは分節ごとのコンダクタンス出力が、必ずしも局所の左室容積に対応しているわけではないということを示している。

Fig. 6 にコンダクタンスカテーテル法を用いて作製した前負荷減少、および前負荷増加による左室圧容積関係の変化の代表例を示した。前負荷を増加させた場合には収縮末期容積は増加したが、左室収縮期圧はあまり上昇しなかった。収縮末期圧容積関係を直線回帰させて求めた時の直線の傾き E_{es} は、前負荷減少で $6.3 \pm 5.2 \text{ mmHg/ml/m}^2$ 、前負荷増加では $2.5 \pm 1.9 \text{ mmHg/ml/m}^2$ で、前負荷減少において大であった ($p < 0.05$)。またこの時の収縮末期圧容積関係の X 軸切片 V_0 は、前負荷減少で $3.4 \pm 12.6 \text{ ml/m}^2$ 、前負荷増加では $-42.1 \pm 37.1 \text{ ml/m}^2$ で、前負荷減少において大であった ($p < 0.05$)。

考 按

コンダクタンスカテーテル法は Baan がその応用を紹介して以来^{1,2)}、わが国でも臨床例の病態解明に用いられている。本法に対してはいくつかの問題点¹¹⁻¹³⁾が指摘され、十分な信頼性を獲得するには至っていない⁴⁾。多くの研究は実験によるもの⁸⁾であり、臨床例での検討は少ない。本研究では本法が左室造影法の成績とよく対応することなど、左室容積の測定に応用する上での妥当性を示した。

Baan ら²⁾は左室造影法とコンダクタンスカテーテル法の対比を行ない、我々とほぼ同じ相関を得ている。しかし、彼らの α は我々よりも大きい。その理由は明らかではないが、使用したカテーテルの大きさ、アンプの増幅度の相違の可能性がある。特に左室の大きな例では α が小なる傾向を有した。彼らの研究で対象とした左室容積は最大で 220 ml であり、それ以上の容積は示して

いない。コンダクタンスカテーテル法は作り出される電場が均一ではなく、各分節によってその重みづけが異なっている。この不均一性は左室が大きくなればなる程増大するわけであるから、左室容積測定の信頼性は小さくなる。最近、より均一な電場を得るために double excitation のコンダクタンスカテーテルが開発された¹⁰⁾。このカテーテルを利用することにより、より信頼性の高い容積測定が可能になると期待される。

左室容積を変化させた場合、左室造影法とコンダクタンスカテーテル法がどのように対応するかを検討することは、個体内の変動を評価する上で重要である。コンダクタンスカテーテル法は左室容積の相対的变化を正確に反映するが、絶対量については個体間でばらつきがあり、個体間を比較することは難しいということが判明した。これは左室の容積に応じて parallel conductance volume が変化する可能性¹¹⁾、 $1/\alpha$ が左室容積に応じて変化する可能性¹²⁾に由来すると思われる。今回の検討でも、 $1/\alpha$ は左室容積と粗な相関を有した。加えて各分節のコンダクタンスの変化が一様でないことも、この左室容積の過小評価と関連する。

$1/\alpha$ が大きくなれば、容積を算出する式からも容易に推測されるように、測定誤差も必然的に増幅されることとなり、本研究でも左室造影で容積が 350 ml 程度の左室が、コンダクタンスカテーテル法で測定すると、 450 ml 以上になってしまうような例があった。

現在、臨床において最も信頼されている左室容積の測定方法は左室造影法である。しかし左室造影法は造影剤を使用しなくてはならないため、短時間のうちに繰り返し行なうことは不可能であること、造影中に期外収縮を誘発する可能性のあること、造影上のシルエットから計算で左室容積を求めるため、左室形態が著しく変形している場合には誤差が大きくなることなどを考慮すると、決して最高の方法ではない。容積曲線を描くには機械による辺縁認知も困難なため、レントゲンフィルムを 1 枚 1 枚トレースする方法しかなく、煩雑

である。時間解像能も 50 フレーム/秒で 20 msec と低く、トレースの再現性も考慮すれば、空間解像能も十分良好であるとは言いがたい。以上の点を勘案すると、今後解決されなくてはならない問題点はあるものの、コンダクタンスカテーテル法は繰り返し容積曲線を容易に得ることができ、他の方法に優っており、臨床応用する価値は十分にあると思われた。

Ees が前負荷の変化のさせ方で異なり、前負荷減少で大きく、増加で小であるということは、収縮末期圧容積関係が直線であるというよりも、むしろ収縮性がよい *in situ* では上に凸の曲線であるという事実と関連する可能性がある。また、収縮末期圧容積関係の X 軸切片 V_0 が負の値になったり、負荷方法で異なってしまうことも、収縮末期圧容積関係が直線ではないということの意味しているのかもしれない。

一方、急速に容積負荷を加えると length-dependent activation¹⁴⁾ が生じ、見かけ上、収縮末期圧容積関係はむしろ急峻になるとも考えられる。下大静脈を閉塞して負荷を減少させた場合とそれが元へ戻る場合では、収縮末期圧容積関係は同じ軌跡を通らないということが示されており、右室の拡張が左室へ影響している可能性も否定できない¹⁵⁾。実験的には右心バイパスを用いた実験でも、前負荷を増加させた場合の方が Ees が小であることが示されており⁴⁾、今回の負荷方法では、十分に収縮期圧が上昇しなかったこと、収縮末期圧容積関係は必ずしも直線ではないということ¹⁶⁾も原因の可能性はあるが、現在のところ、この理由を明確に説明することはできない。いずれにせよ、収縮末期圧容積関係を *in situ* の臨床例に応用する場合には、その負荷方法に十分配慮する必要があると思われた。

結 論

コンダクタンスカテーテル法による左室容積の測定は、左室造影法による左室容積の測定と対応し、臨床例の容積曲線を得る上で有用であった。

しかし、コンダクタンスカテーテル法の方が左室造影法よりも、容積変化を小さく表現する傾向を有した。これはコンダクタンスカテーテルの分節のコンダクタンスの変化が一様でないことと関連すると思われた。前負荷を増加させた場合と減少させた場合では、収縮末期圧容積関係の傾きは異なった値を示し、収縮末期圧容積関係を臨床例に応用する場合には、負荷方法についても考慮する必要があると思われた。

要 約

コンダクタンスカテーテル法 (CON) と左室造影法 (LVG) とで求めた左室容積を比較し、CON の得失を明らかにし、さらに前負荷を増加させた場合と減少させた場合の収縮末期圧容積関係 (ESPVR) の相違を検討し、CON を用いた ESPVR の臨床応用の可能性を検討することを目的とした。

心臓カテーテル検査を施行した 14 例の各種心疾患患者に、8 回の基本心房刺激後、連結期 500 msec の早期心房刺激を加え、期外収縮後収縮増強により変化した左室容積を LVG と CON で対比した。また、下大静脈閉塞と急速右房内輸液により ESPVR を求め、その傾き (Ees) をそれぞれ求め比較した。

CON により得られた容積 (V_{CON}) は LVG で得られた容積 (V_{LVG}) と関連した (拡張末期容積; $V_{CON}=1.09V_{LVG}-4.66$, $r=0.95$, 収縮末期容積; $V_{CON}=1.42V_{LVG}-18.2$, $r=0.89$)。期外収縮増強によりもたらされた左室容積の変化 (ΔV) は LVG と CON で関連した (拡張末期容積; $\Delta V_{CON}=0.52\Delta V_{LVG}+0.94$, $r=0.76$, 収縮末期容積; $\Delta V_{CON}=0.42\Delta V_{LVG}-4.78$, $r=0.72$)。しかし、その一次回帰式の傾きは 0.5 前後で、LVG に比べて CON の方がその変化を小さく評価した。両者の左室容積曲線は相似形であった。左室容積変化に伴うコンダクタンスカテーテルの分節毎のコンダクタンス出力の変化は一様ではなかった。Ees は前負荷減少で 6.3 ± 5.2 mmHg/ml/m², 前負荷増

加で $2.5 \pm 1.9 \text{ mmHg/ml/m}^2$ で前負荷減少において大であった ($p < 0.05$).

CON による左室容積の測定は LVG による左室容積の測定と対応し、臨床例の左室容積曲線を得る上で有用であった。しかし、CON の方が LVG よりも左室容積変化を小さく表現する傾向を有した。これは CON の分節のコンダクタンスの変化が一様でないことと関連すると思われた。前負荷を増加させた場合と減少させた場合では Ees は異なった値を示し、ESPVR を臨床例に应用する場合には、負荷方法についても考慮する必要があると思われた。

文 献

- 1) Baan J, Aouw Jouw TT, Kerkhof PLM, Moenk RJ, van Dijk AD, vander Velde ET, Koops J: Continuous stroke volume and cardiac output from intra-ventricular dimensions obtained with impedance catheter. *Cardiovasc Res* **15**: 328-334, 1981
- 2) Baan JB, vander Velde E, de Bruin HG, Smeenk GJ, Koops J, van Dijk AD, Temmerman D, Senden J, Buis B: Continuous measurement of left ventricular volume in animals and humans by conductance catheter. *Circulation* **70**: 812-823, 1984
- 3) Burkhoff D, vander Velde E, Kass D, Baan J, Maughan WL, Sagawa K: Accuracy of volume measurement by conductance catheter in isolated, ejecting canine hearts. *Circulation* **72**: 440-447, 1985
- 4) Burkhoff D: The conductance method of left ventricular volume estimation: Methodologic limitations put into perspective. *Circulation* **81**: 703-706, 1990
- 5) Kass DA, Yamazaki T, Burkhoff D, Maughan WL, Sagawa K: Determination of left ventricular end-systolic pressure-volume relationships by the conductance (volume) catheter technique. *Circulation* **73**: 586-595, 1986
- 6) Krukenkamp IB, Silverman NA, Kollmorgen TA, Levitsky S: Preloading history influences pressure volume derived indices of myocardial contractility in the ejecting canine left ventricle. *J Thorac Cardiovasc Surg* **97**: 551-561, 1989
- 7) Freeman GL, Little WC, O'Rourke RA: The effect of vasoactive agents on the left ventricular end-systolic pressure-volume relation in closed-chest dogs. *Circulation* **74**: 1107-1113, 1986
- 8) Dodge HT, Sandler H, Ballew DW, Load JD Jr: The use of biplane angiocardigraphy for measurement of left ventricular volume in man. *Am Heart J* **60**: 762-767, 1960
- 9) Greene DG, Carlisle R, Grant C, Bunnell IL: Estimation of left ventricular volume by one-plane cineangiography. *Circulation* **35**: 61-69, 1967
- 10) Principal Investigators of CASS and their associates (Killip T, Fisher LD, Mock MB): The National Heart, Lung, and Blood Institute Coronary Artery Surgery Study (CASS). *Circulation* **63** (Suppl): I-1-I-81, 1981
- 11) Boltwood CM Jr, Appleyard RF, Glantz SA: Left ventricular volume measurement by conductance catheter in intact dogs: Parallel conductance volume depends on left ventricular size. *Circulation* **80**: 1360-1377, 1989
- 12) Applegate RJ, Cheng CP, Little WC: Simultaneous conductance catheter and dimension assessment of left ventricle volume in the intact animal. *Circulation* **81**: 638-648, 1990
- 13) Steendijk P, Jager HN, vander Velde ET, Baan J: Left ventricular volume and shape by dual excitation of the conductance catheter. *Circulation* **78** (Suppl): II-225, 1988
- 14) Tucci PJF, Bregagnollo EA, Spadaro J, Cicogna AC, Ribeiro MCL: Length dependence of activation studies in the isovolumic blood perfused dog heart. *Circ Res* **55**: 59-66, 1984
- 15) Maughan WL, Kallman CH, Shoukas A: The effect of right ventricular filling on the pressure volume relationship of the ejecting canine left ventricle. *Circ Res* **49**: 382-388, 1981
- 16) Burkhoff D: Contractility-dependent curvilinearity of end systolic pressure volume relations. *Am J Physiol* **252**: H218-H227, 1987