27 超音波パルス反射法による心臓内血流の可視化

東北大抗研 田中元直[○] 仁田新一 渡辺恵
東工大精研 奥島基良

Visualization of the intracardiac blood flow by ultrasonic reflection method

Motonao TANAKA, Shinichi NITTA, Satoru WATANABE and Motoyoshi OKUJIMA*

For the purpose of visualization and measurement of the intracardiac blood flow, contrast cardiography which is a method of recording simultaneously the intracardiac blood flow and cross section pictures of the heart in dynamic status by using the ultrasonic pulse reflection technique is investigated. From the fundamental experiment, it is confirmed that saline is the most suitable material for producing the artificial contrast echoes in the blood because it differs in acoustic impedance from the blood and is harmless to patients.

In clinical application of this method, about 10 to 15 cc of saline is injected into the cardiac chambers through the catheter or a peripheral vein which a ultrasonic cardiogram is continuously displayed on the CRT screen by a high speed sector scanning. Artificial echoes are produced in the cardiac chambers just after injection of the saline and flow together with the intracardiac blood stream. Thus we can easily determine the direction, flowing status, and timing of the occurrence of an abnormal flow in the cardiac chambers in such cases with a regurgitant flow in valvular diseases and with a shunt flow in congenital heart diseases.

Furthermore, according to this method utilizing the M-mode, the direction and flowing status such as eddy or jet can be identified by the echo pattern in more details. Also the flow velocity can be determined by measuring the inclination of the M-mode pattern.

生体の心臓内で血液がどのような流れ方をするか？ という問題は心臓病の診断とそのポンプ機能を評価する上で重要な問題であるがほとんど解明されていない。その可視手段としてX線造影法が用いられてきたが、透過画像であること、心臓構造物の病変との関連が把握し難いこと、副作用があることなど問題点が多い。そこで我々は1969年以来変調方式超音波ドプラ法と又1978年以來超音波パルス反射法を利用して心臓内血流の観察および測定する方法について検討してきた。

こゝではパルス反射法を用いた方法を心断層造影法と稱して、その検討結果と有用性について報告する。

装置と方法

この方法は超音波ビームで心臓部を走査して無害な薬剤を心臓内に注入して人工的エコーを生ぜしめ超音波に断層図上に血流情報を重畳させて観察する方法である。周波数2.5MHz～3.5MHzでパルス幅1～4波長のパルス超音波を繰返し

Research Institute for Chest Diseases and Cancer, Tohoku University, Seiryomachi, Sendai 980

*Tokyo Institute of Technology, Nagatuda, Yokohama 152

周波数4000/秒で放射しつつ、超音波ビームを扇形に走査せしめる。走査速度は30画面/秒程度である。直径13cm, 曲率半径75mmの円形凹面振動子で機械的に走査する方式および素子数32枚の微小振動子を径17mmの矩形振動子にまとめた位相制御方式で電子的に走査する方式で走査した。

注入剤と注入方法の検討

生体に無害な薬剤として生食水, ブドウ糖液, リンゲル液等多くのものがあるが安価なものとして生理的食塩水(生食水)を検討した。超音波の反射は境界面を形成する2媒質の音響インピーダンスの差に比例する。そこでこれらの物質について音響インピーダンスを求めたところ, 生食水: 1488×10^3 , 血液: $1680 \times 10^3 \text{ g/cm}^3/\text{sec}$ で, 空気と生食水との境界における強さの反射率を0 dBとすると, 血液と水とのそれは-24.4 dBであり, 充分検出可能な強さのエコーが得られる可能性が示された。一方注入液は注入法によって流血中で微細水滴状に破碎される可能性がある。そこでどの程度の大きさの水滴までエコーを捉えうるかを検討した。凹面振動子を用い, その集束附近に気泡群をおいたときの強さの反射率との比較で計算すると, 曲率半径100mm, 半径10mm, 周波数2.5MHz,

送波を4波としたとき気泡群については[図1]の結果を得た。受信器のS/Nを考慮して増幅度を60dBとみると, 気泡の場合は1mm³中1個の割合では約7μmの大きさで検出できるが血液中の水滴では約70μmの大きさ以上であることが必要であると考えられた。従って注入時には可能な限り塊状に注入することが必要であるといえる。以上の結果を基礎とし, 実験的に確認した結果が[図2]である。

Fig. 1 Correlation between the intensity of the bubble echoes (vertical axis) and the number of air bubbles. a: radius of bubbles, B: blood, W: water, A: air

Fig. 2 Contrast echo patterns obtained by the fundamental experiment. Fresh human blood is injected into the 15°C saline with various injected speeds.

図2は約1500ccの15℃生食水中に新鮮血を種々の速度で注入したときのエコー性状を示した。生体中での超音波減衰を考慮し約50dB利得を下げて観察した。注入時に粗大顆粒状のエコーで示されたものが拡散と共に微細顆粒状となり、注入後約30秒以上に亘って観察されたことが判明した。

臨床応用実験

僧帽弁閉鎖不全症および心房中隔欠損症など逆流あるいは短絡を生ずる疾患を対象として臨床実験を行った。扇形走査法により胸壁上から心臓断層図を連続的に描写している間に心臓内に挿入した内径約2mmのカテーテルを通して約50℃の生食水約10～15ccを可及的すみやかに用手的に注入して観察した。その結果の一部が図3および図4である。図3は心臓の水平断面で僧帽弁口部を斜めに横断した断面像である。

接合不全の部分から左心房へ人工的エコーが噴出する様子が示されている。図4は僧帽弁を縦断する断面のもので、左心房への逆流が収縮を過と共に方向を変える様子が観察できる。

(S₁は収縮期の始め、S₄は末期のときの方角を示す)。中隔欠損症などでは右→左あるいは左→右への短絡が証明できた。逆流および短絡流について、その発生時期、程度、方向、場所を知る有力な手段となることが判った。

流水の性質の評価

断層法では生体内における超音波減衰と走査速度との限界から、得られるエコ

Fig. 3 The direction of a regurgitant flow during systole in a case of mitral insufficiency are demonstrated. These photographs are taken at the level of the mitral orifice. Contrast echoes are shown under photographs. White arrow above photograph shows a regurgitant orifice.

Fig. 4 Changes of the direction of a regurgitant flow during systole in a case of mitral insufficiency. These tomograms are taken along the longitudinal direction of the heart. S1: early systolic phase, S2 and S3: midsystole, S4: late systole

一はいずれも粗大顆粒状エコーとなり微細なエコーは検出が難しく渦流の噴流の層流性の乱流性の如き流水の性質の判断に問題があった。そこで更に、同時にM-mode表示法で描写する方法を導入し、そのpatternの上で流水の性質の判断を試みた。内径約20mmのビニール管内に口径約5mmのノズルを設置し、ピストンポンプにより1回約40ccのストロークで脈動流を作り、光学的手法と超音波による手法とで検討した。光学的手法は約1mmのスリット光を利用し、流水中に合成樹脂粒子を流してコマ撮り撮影し、同一脈動流を超音波ドプラで、ハルス反射法のM-mode表示とで観察した。その結果が図5および図6である。図5はノズルのないとき、図6はあるときで上図の矢印の方向に超音波ビームを投入した。M-mode表示(中程)では層流状の流れは描いた右上りあるいは右下りの曲線で示され、噴流の強い乱流は右上りと右下りの曲線が混在して示された。このpatternから流水の性質が判断でき、又曲線の傾斜から流水の凡々の速度および速度分布が測定できることが判った。

おまけ

以上の実験的、臨床的結果から生理的食塩水を至血管内カテーテルを介して注入し人工的にエコーを作って観察する方法は生体の心臓内血流の可視化の手段として実用性の高い方法であり、M-mode表示法との併用で流水の性質の判断と速度の測定も可能であると結論できた。

Fig. 5 Flow patterns obtained by utilizing the M-mode (middle photograph) and the modulation Doppler method (under two photograph). Pulsatile flow is used.

Fig. 6 Flow patterns obtained in a case of pulsatile jet flow. The direction of the ultrasonic beam shows a white arrow.