

心雑音発生機序の検討 (1)

The production mechanism of cardiac murmurs (1)

田中 元直
 柏木 誠*
 香坂 茂美
 寺沢 良夫*
 目黒泰一郎*
 引地 久春*
 渡辺 恵*
 武田 久尚*

Motonao TANAKA
 Makoto KASHIWAGI*
 Shigemi KOSAKA
 Yoshio TERASAWA*
 Taiichiro MEGURO*
 Hisaharu HIKICHI*
 Satoru WATANABE*
 Hisanao TAKEDA*

Summary

In order to investigate the mechanism of production of the heart murmurs, relationships between the spectrum of the murmur and that of the ultrasonic Doppler signals of the turbulent flow in the heart were examined. Autocorrelation of the murmurs and that of the Doppler signals were also analyzed. Furthermore, in vitro experiments were carried out on hydraulic models with a nozzle. The correlations between the flow pattern of the turbulent jet from the nozzle and the characteristics of the murmur which appeared simultaneously on the outer wall of the tube were investigated.

The spectrum patterns of the diastolic murmur in aortic insufficiency and the systolic murmur in ventricular septal defect were similar to those of the ultrasonic Doppler signals over the left ventricular outflow tract or the right ventricle, respectively.

Based on the autocorrelations, it was found that the components with quasi-periodic fluctuation were contained in the heart murmurs and in Doppler signals, both were apparently random. Then experimental measurements were made by using a steady flow and pulsatile flow through nozzles having various shapes and diameters. At the areas, at which the core flow fell into decay, the axial flow of the jet began to fluctuate and eddies appeared periodically in the outer portion of the axial flow near the wall of the tube. The most intense and highest-pitch noises were detected at the same area on the wall.

The most intense area of noise was dependent chiefly on the geometry of the nozzle. The intensity of the recorded noise was also related to the flow velocity at the exit of the nozzle.

These results suggested that the high speed jet causes a marked fluctuation in width of the axial flow and that the geometry near the narrowed portion of the tube is a very important factor

東北大学 抗酸菌病研究所
 *仙台厚生病院
 仙台市広瀬町4-12 (〒980)

The Research Institute for Tuberculosis, Leprosy and Cancer,
 Tohoku University, Hirose-machi 4-12, Sendai, 980
 *Sendai Kcsei Hospital, Sendai, 980

for the intensity distribution of the noise, i. e. for the extent in which the noise was generated. Kinetic energy of the fully-developed turbulence which developed spatially was converted partly into acoustic energy. Presumably the acoustic characteristics of the noise produced by the jet-like flow were related to the number and period of the production of the eddies surrounding the axial flow.

Key words

flow pattern of the turbulent jet
distribution of noise sources
M-sequence modulated ultrasonic Doppler method
spectral PCG
hydraulic model

はじめに

心雑音の発生機序については“乱流とそれを取り囲む境界構造物との間の複雑な相互作用によって生じる”という極めて漠然とした概念によって説明されているが、定量的な検討は十分なされていない。¹⁾ とくに騒音性雑音については、ランダムな信号が分析対象であるためその取扱いは非常に困難である。²⁾ そこで騒音性雑音の発生機序説明の第1段階として、今回主に乱流のフローパターンと雑音源の強度分布との関連について検討したので報告する。

方法

臨床例では、超音波断層法、M系列変調超音波ドプラ法、およびスペクトル心音図法を用いた。またモデル実験では透明なビニール管（内径39 mm、および19mm で、厚さはともに 2mm）の中に流線形のノズル（内径18mm, 10mm, 6mm, 4mm）を取り付け、水とグリセリンとの混合液を2種類の方法（一定の落差のみによる方法とピストンの往復運動による方法）で駆動して流した。以下前者を定常流、後者を脈動流と呼ぶことにする。フローパターンの写真撮影時および、M系列変調超音波ドプラ法（以下単にドプラ法という）により水流信号を得る時には、この混合液と同比重のアンバーライト（イオン交換樹脂の1種、直径約0.3~0.4mmの粒子）を混合液の中に加えた。管壁上で雑音を録音する際には、この粒子を加え

なかった。脈動流の場合電動式カメラのリモート回路をピストンと連動させ、ピストンが任意の位置に達した時シャッターが動作するようにした。なお、雑音はすべてフィルターMで録音し、周波数分析はリオンのサウンドスペクトログラフSG-07を使用した。心雑音、血流のドプラ信号、管壁上での雑音の相関分析には、データレコーダーにより速度変換をしてから、実時間デジタル相関計（TEAC C-100）で分析した。心雑音、およびドプラ血流信号分析の時には、心電図R波をトリガー信号とし、遅延回路を通して、心周期の任意の瞬時間を選択し、その時点で計算を停止させ、その計算結果を得た。

結果および考察

1) 胸壁上雑音と流れとの関連

左第3助間胸骨左縁で記録した大動脈弁閉鎖不全症の拡張期雑音と、左室拍出路部の逆流による方向指示なしのドプラ信号との同時記録を見ると、そのスペクトラムのパターンは互いに良く類似している(Figure 1)。しかし、心室中隔欠損症では右室内の方向指示なしのドプラ信号のスペクトラムは収縮期雑音のそれよりも高い周波数成分まで含んでいることがある。大動脈弁閉鎖不全症の場合には超音波ビームが拍出路の逆流の軸に直角に近い角度で入射するため、得られたドプラ信号には、雑音発生と関連する乱れた流れの成分からの反射波が多く含まれているが、心室中隔欠損症では、

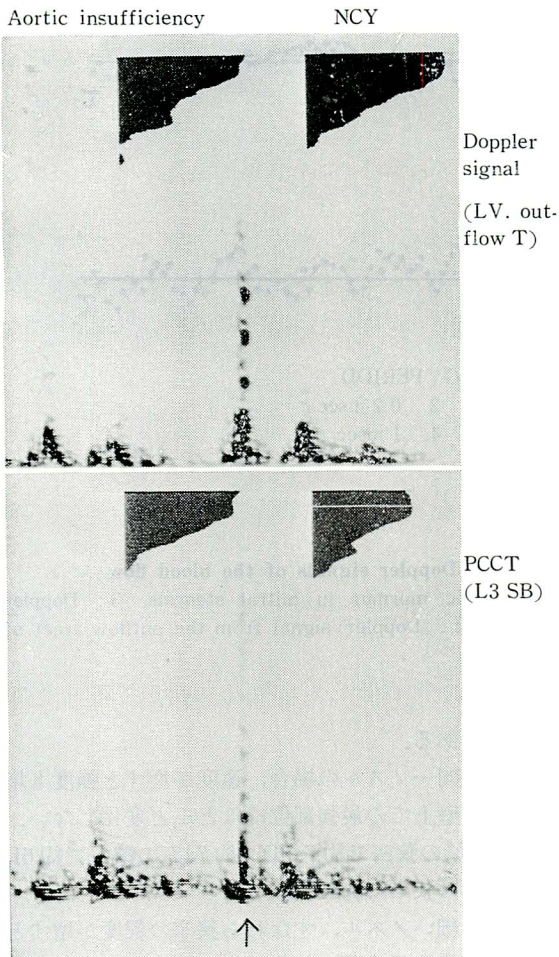


Figure 1. Sound spectrograms of the diastolic heart murmurs and those of the Doppler signals obtained from the regurgitant flow over the left ventricular outflow tract in aortic insufficiency

The black arrow shows a time mark signal. Spectra show similar patterns each other. LV. outflow T: outflow tract of the left ventricle. L3SB: third intercostal space at the left sternal border.

左室から右室へ向かうジェット状の血流に対して前胸壁から入射するビームの方向が平行に近い得られた信号には jet 中心付近の十分乱れていない速い流れの成分による血流信号が含まれているためと考えられる。このような事実から速度の

早い乱流程高い雑音を発生していると考えられる。この対応関係がなく、どの疾患でも雑音はみな‘完全に乱れた’流れによってのみ発生するとすれば、伝搬経路や減衰を問題にしない段階の雑音発生は、どの心雑音も一様にホワイトノイズ様になり、とくに差の無いものになる可能性が強くなる。しかし、実際には流れの条件が異なれば、それに応じて発生する雑音の性質も異なるはずである。そこでまず、流れや雑音の中に完全にはランダムでない信号が含まれているかどうかを種々の疾患における自己相関関数について検討した (Figure 2).

2) 心雑音とその発生に関連する乱流信号の自己相関関数について

対象は心室中隔欠損症の収縮期雑音、僧帽弁狭窄症の方向指示なしの収縮期大動脈内ドプラ信号、定常流のモデル実験で発生した雑音などの5種類である。臨床例およびモデル実験、いずれの場合でも単純なパターンではないが、波打っており周期性をもっている。ここで得られた乱流のドプラ信号は乱流中のある一部分についての情報であり、心雑音は胸壁上の最強点で得られたものであるが胸壁に伝搬されたもので、信号としては総合されたものである。従って両者のパターンの間には当然差が生ずることになる。しかし、外見上ランダムに見えるこれらの信号の中に単一ではないにせよ、準周期的に変動する成分が混存しているということは、心雑音のスペクトルとその原因になると考えられる乱流にはある程度の周期性がありかつ、乱流と雑音とが関連性をもつことが推定される。これらの周期的成分が実際には、流れのどのような物理現象に対応しているかを知るには、流れの場のベクトル量としての速度変動とそれに伴う圧変動および発生する雑音のスペクトラムの変動を経時的、かつ空間的に同時に知る事が必要となる。

3) 実験的乱流と雑音との関連

上述の如く、胸壁上で記録される雑音は胸腔内で生じている乱流と密接な関連をもつことが考えられる。その関連性のうち、今回は簡単なモデル実験によって、A) 雑音の管壁上での強度分布、

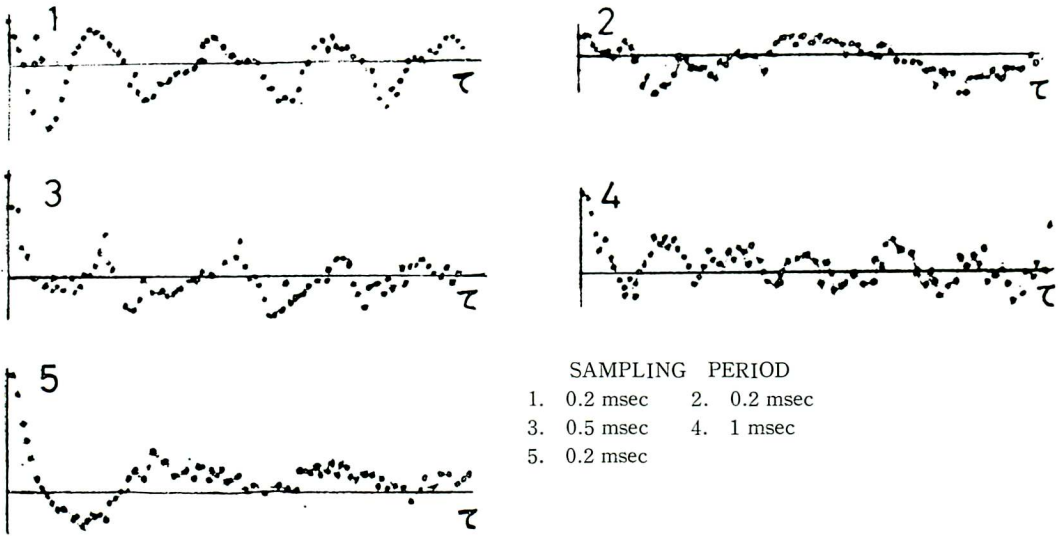


Figure 2. Autocorrelation functions of the heart murmurs and Doppler signals of the blood flow

1: systolic murmur in ventricular septal defect, 2: diastolic murmur in mitral stenosis, 3: Doppler signal from the right ventricle in endocardial cushion defect, 4: Doppler signal from the outflow tract of the left ventricle 5: noise generated by the nozzle jet

B) 水流のドブラ信号, C) フローパターンについて報告し, これらの相互関係から主たる雑音源の分布について述べる.

④ 雑音の強度分布 (Figure 3, 4)

Figure 3 の左上, 下と右上は流線形の金属ノズル (出口の内径6mm, 10mm, 18mm) からの噴流による雑音の強度を定常流のモデル実験について示したものである. 管の内径は 39mm で, 強度は最大の値を 0 dB とし て相対的な値で示してある. また, ノズルからの距離はこの論文ではとくにことわりのない限りそれぞれの出口内径の値 (D) を基準とし, その何倍であるか ($\times D$) で表わした. また Figure 3 の右下のグラフはこれらの結果の一部をノズル出口の平均流速を横軸に強度を縦軸にとったものである. 速度は断面積の異なる 2 点にあけた直径 3mm の孔の水柱の高さの差と断面積の比とから算出し, さらに一番遅い値を基準にして示した. これらの結果から

1) 遅い流れの場合, あるいは太いノズルの場合には 1 つの曲線上に結果が乗らないでバラつく

傾向がある.

2) 同一ノズルの場合, 速度が増すと強度も増すが管壁上での最強部位はほとんど変化しない. (約85%の狭窄で約7.5D, 約74%の狭窄で約6D, 約54%の狭窄で約2.5D).

3) 細いノズル, すなわち狭窄の程度が増すと雑音の最強部位はより下流側になり, 同時に強い雑音が記録される範囲が広がる. すなわち, 最強部位から上流側も下流側もともに減衰の程度が小さくなる.

4) 速度のみを変えた同一ノズルの同一部位での強度については速度が増加すれば強度も増加し, 速度に大きく依存するといえる. しかし, 3種類のノズルにすべてあてはまる関数関係を決定出来なかった. これは強度が速度のみの関数ではない事を示していると考えられる. 次に一番小さい値を基準にした流量と強度との関係を見ると

1) 流量が増しても必ずしも強度が大になるとは限らず, 太いノズルで流れが遅い場合は流量が大でも強度は大きくならない.

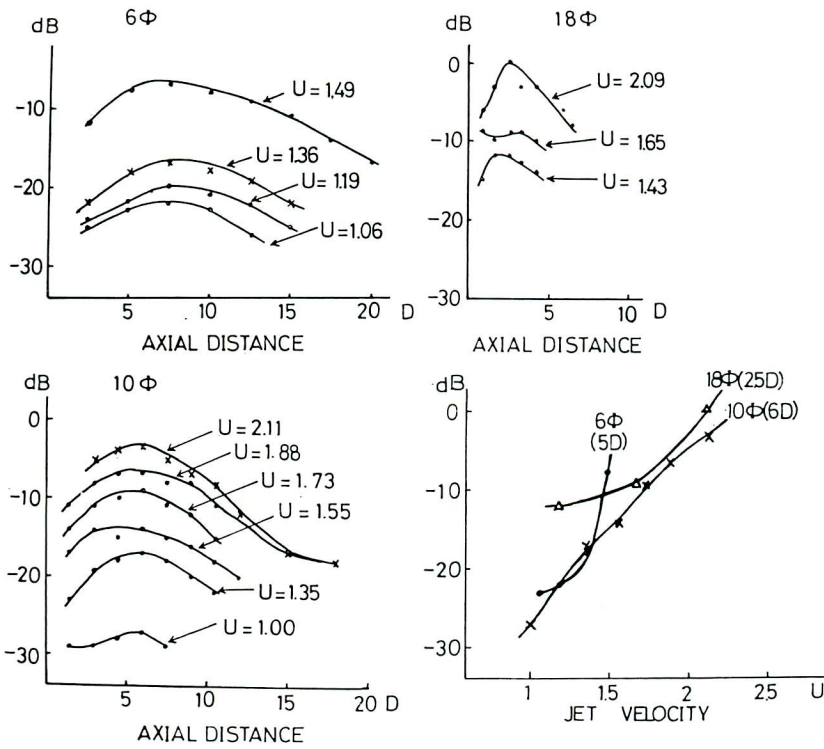


Figure 3. Intensity distribution of the noise on the wall of hydraulic models

Axial distance and velocity were normalized by the nozzle diameter and by minimum velocity respectively.

U: velocity, at the nozzle exit, D: nozzle diameter

The right bottom figure shows relationships between intensity of the noise and velocity of the jet

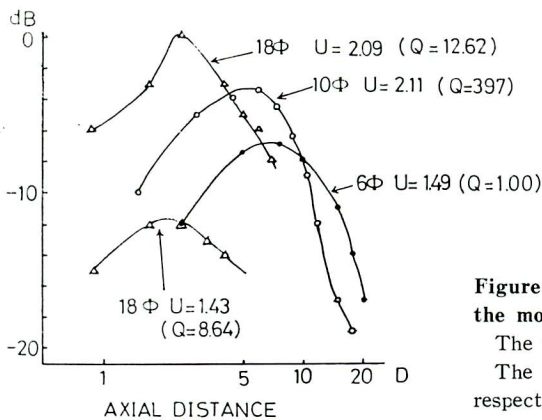


Figure 4. Intensity distribution of the noise on the wall of the models

The flow rate (Q) are normalized by minimum rate.

The diameter of the nozzle used were 6mm, 10mm and 18mm, respectively.

2) 最強部位は流量が大きいノズルではむしろ上流側に位置する。

以上の事から, 急拡大の流れから発生する雑音はノズル先端が音源となって下流に伝搬するのではなく, 直径の2~8倍の距離に最強部位を持ち, 音源の範囲はノズルの径, すなわち, 狭窄部近傍の幾何学的形状に, また強度そのものはむしろ速度に大きく依存しているといえる。

また, 内径19mmのビニール管の中に内径4mm

のプラスチック製ノズルを設置した時の脈動流で発生した雑音の周波数分析では, ノズル下流1cm(1.25D)から4cm(10D)までは高い周波数まで伸びており, 高い周波数成分(2KHz以上)の信号は2KHz以下の成分に比べ高さに径時的な起伏がみられる(Figure 5)。

2cm(5D)では最も高くまで伸びた状態が長く持続している。この場合約79%の狭窄で約5Dに最強部位があることになる。また, 下流側では上

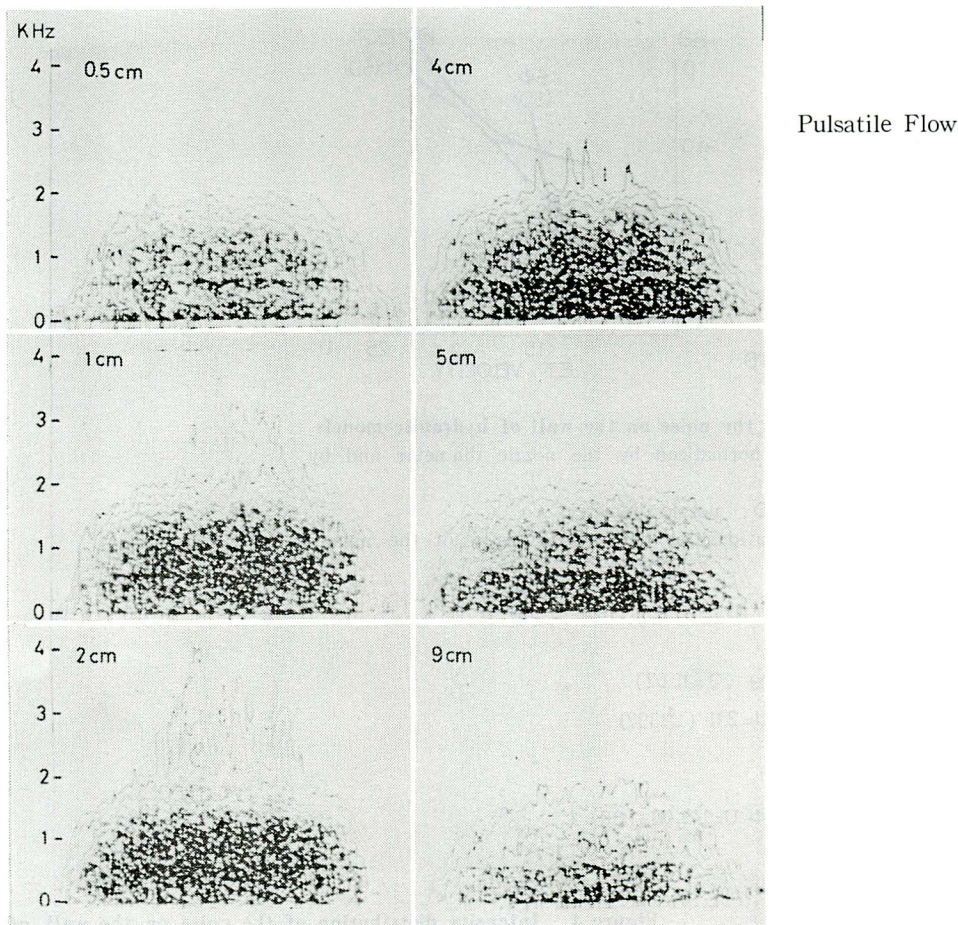


Figure 5. Sound spectrograms of the noise recorded on the wall of the model

Hydraulic model used consists of a vinyl tube of 20mm in diameter and the nozzle with a diameter of 4mm. The experiment was carried out using a pulsatile flow. Distance shown in this figure was measured along the tube axis from the nozzle exit. 1D=4mm

流から伝搬してきた雑音もピックアップしているが、例えば9cmの雑音の強い成分は上流側のそれよりも低い周波数帯にあり、強さも小さいことがわかる。これは定常流の場合も同様であり、ノズルの種類と無関係に成り立つ、狭窄の程度と流速と周波数との間の関係は Strouhal 数で代表されると考えられるが、上述の結果からこれは気流の速度とワイヤの径を変化させ広い空間で実験をした場合に成立する関係であり、心雑音のような場合には無条件に成立しない事が今回のモデル実験で推定された。

⑧ 水流のドプラ信号 (Figure 6)

超音波ビームをビニール管の軸に対して上流側に60度傾けて入射し、管中心軸と管壁との中間部

分における水流のドプラ信号を方向指示方式で観察した。ノズル出口 (OD) にあたる位置では Figure 6 の 1 の如く、また、約 3.75D にあたる位置では Figure 6 の 2 の如くで、ビーム方向に対して近づく成分と遠ざかる成分が同時に出ている。とくに 2 ではこの 2 成分ともに高い周波数まで強く記録されている事から、種々の方向に乱れた流れが高速で流れていると思われる。約 13.75D にあたる 3 と約 21.25D にあたる 4 ではこのようなパターンを示さず振動子に接近する成分 (下向き) が強く、とくに 4 では下流方向へのゆっくりした脈動流になっている。さらにこの図で判るように一見ランダムにみえる乱流もその速度成分は全体として正方向と負方向 (すなわち、管壁

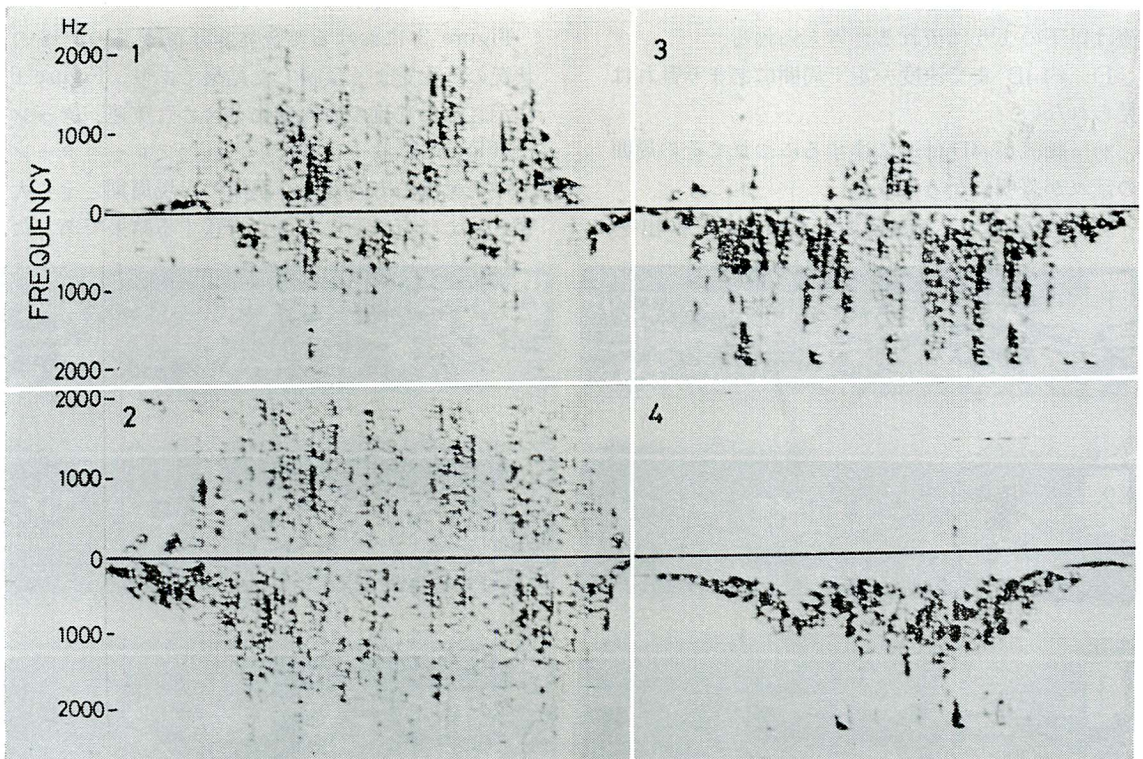


Figure 6. Sound spectrograms of the Doppler signal of turbulent flow in the same experiment as in Figure 5
Doppler signals represent a method of direction-display.

The frequency components under 0 frequency represent the forward flow and those above 0 the backward flow.

Pattern 1: obtained at the exist of the nozzle. Pattern 2: at the distance of 3.75 times of the diameter of the nozzle orifice (3.75 D), Pattern 3: 13.75 D, Pattern 4: 21.25 D

に近づく流れと遠ざかる流れ)の成分が交互にみられ, 周期性が存在している.

◎ フローパターン (Figure 7, 8)

脈動流における駆出時間1秒の間のフローパターンをシャッター速度1/125秒でほぼ等間隔に撮影したのが Figure 7 で, 1が駆出初期, 6が駆出終期に相当する. また3の時相に相当する写真をシャッター速度を変えてとったものが Figure 8 である. 駆出の進行とともにノズルから1cm(3D)から4.5cm(11D)あたりまでの部分が激しく乱れ駆出後半には乱れがおさまっていく様子が良くわかる. またシャッター速度1/500秒の写真から速度一定のコア流れが約1.5cm(4D)まで続いていることがわかる.

Figure 7, 8 を総合すると, ノズルから出た噴流は以下のように流れると考えられる.

- 1) 約4D まで速度一定で周囲にあまり乱れは見られない.
- 2) 軸流が4D付近に達するにつれてその周囲の乱れが著明になってくる.
- 3) 4D付近から軸流は波打ちはじめ, 駆出と

ともに周期的に上方を向く時期と下方へ向う時期とが交互に生じ, 同時にその周囲には渦流が出ては下方に移動してから消えつつ全体として互いに激しく混合して11D付近まで非常に乱れた流れになる.

4) 噴流の速度が増すと乱れ始める部位がノズル側に近づき, 下流側ではより遠くまで乱れる.

5) 11Dあたりから下流側では軸流のうねりが, さらに増すが, 逆にその周囲の乱れは次第におさまっていく.

6) 20Dあたりから下流はほぼ層流になる.

以上のパターンは定常流の場合も同様である. またここには図示しないが, ノズルの径が大きになると乱れ始めの位置が上流側になることもフローパターンの写真からわかった.

Figure 3 における雑音強度分布はこの流れの状況の変化をよく反映した結果であり, Figure 6 に示された乱流の方向変化を含めた流速パターンは Figure 7 および8に示されたフローパターン上での軸流の方向変化, 渦流の出現周期とその大きさおよび方向変化とよく一致する結果であった.

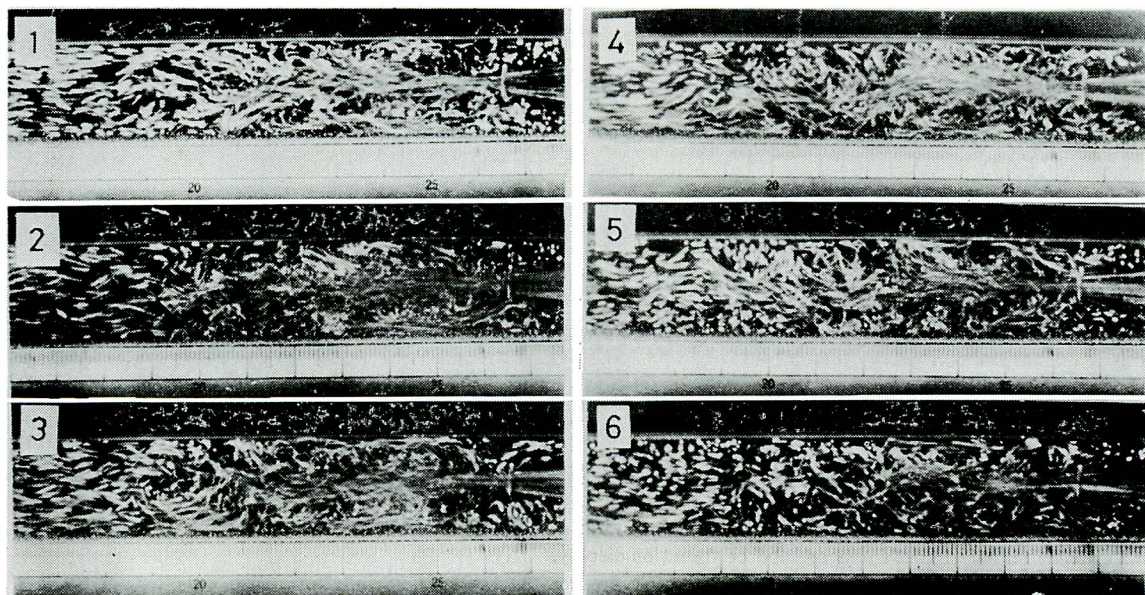


Figure 7. Photographs of the successive flow patterns during 1 cycle of the pulsatile flow

1: early ejection phase, 6: late ejection phase. shutter speed: 1/125 sec.

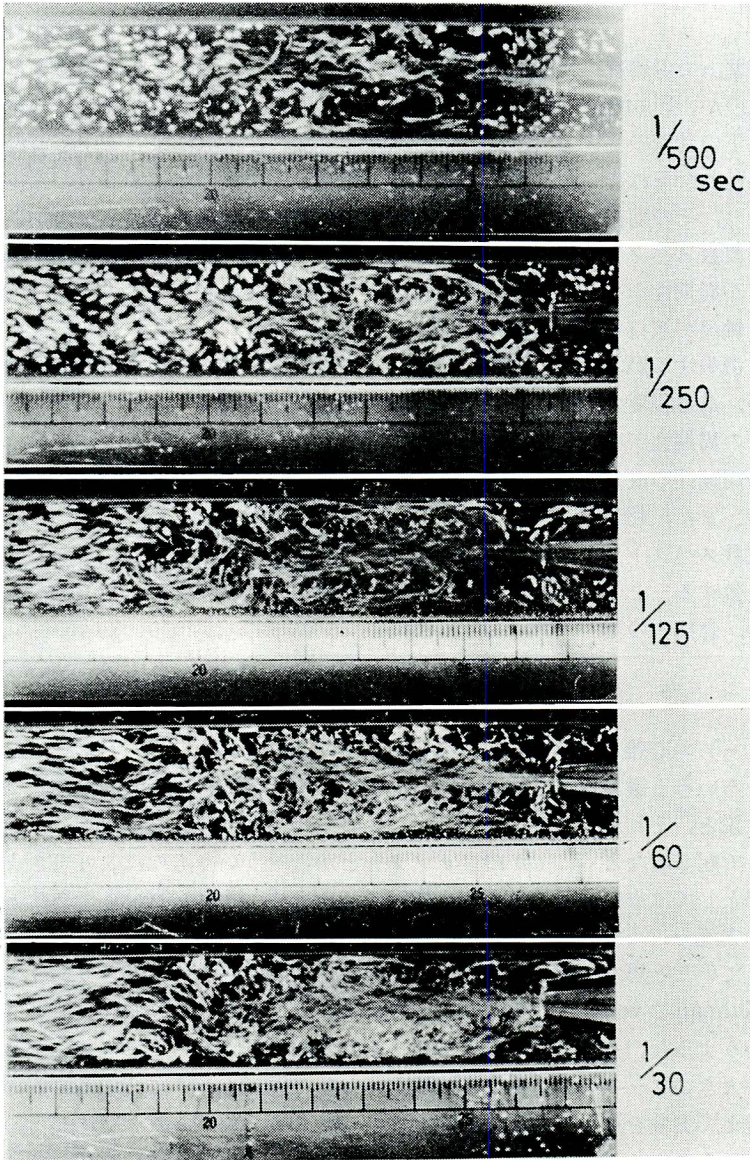
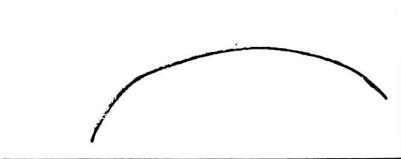


Figure 8. Instantaneous flow pattern at the mid ejection phase

These patterns were obtained by changing the shutter speed of camera at the same phase.



STRENGTH
OF NOISE
SOURCES

AXIAL DISTANCE

Figure 9. Schematic representation of the relationships between the flow pattern and intensity (strength) distribution of the noise or extent of the noise source.

総括

以上述べたモデル実験における管壁上での雑音強度分布の結果を模式的に表わしたのが、Figure 9である。すなわち、ある流れの条件下の乱流のフローパターンのうち、もっとも強く乱れた流れになる所での管壁で雑音強度は強くなり、その前後では比較的弱くなる。そしてその周波数スペクトルも高音成分を含みかつ僅かであるが周期性をもって変化する。その部分の内部では軸流が波打ち、その周囲には数多くの渦流が出現、消失するが、その内でも大きい渦と小さい渦とが、ある程度の周期性をもって交互に発生する。この周期性が心雑音あるいは心臓内ドプラ信号の準周期性の成分として認められたものと考えられる。また、超音波ドプラ周波数と管壁の雑音の周波数スペクトラムの間では最も高い成分はほぼ一致する。このような事実から jet 状の乱流でかつ、急拡大の流

れによって生ずる雑音はノズル尖端（狭窄開口部）が音源となるのではなくて、それより離れた比較的広い部分から生じ、雑音として変換されるエネルギーは軸流の乱れと乱流によって生ずる渦状流に関連して発生し、渦流の発生する数と発生周期とによって、雑音の強さおよび高さが決定されてくるものと考えられた。心雑音の発生機序の一部は同様のメカニズムが働いて生ずるものと推定された。

終りに相関分析についてご教示頂いた東北大脳研内科、佐藤 元助教授に感謝致します。

文献

- 1) Luisada AA: The Sounds of the Normal Heart. W Green, St Louis, 1972, p 79
- 2) Rushmer RF: Cardiovascular Dynamics 3rd ed, Philadelphia, WB Saunders Co, 1970, p 315

討論 (司会: 藤井諄一)

町井 (三井記念病院循環器センター): 心雑音の発生機序については相当昔からいろいろと議論がありまして、乱流で起こるといふ説と、それから渦で起こる、あるいは cavitation で起こるなどといわれておりますけれども、大勢としてはやはり乱流でなくて、普通の場合、渦が主流を占めているのじゃないかということになっていたと思うのですが、いまのお話では、目標は Kalmán の vortex street とかあるいは wake というような、そういうものが雑音の成因として一番大きいファクターじゃないか、そういうふうにかけて実験を進めておられるのでしょうか。下流のほうにいくとだんだん周波数が低くなるというふうな wake の性質をおっしゃっておられましたが、そういうふうにかけておられるのでしょうか。

演者 (柏木): 強さと周波数の関係が問題だろうと思いますが、はっきりした定量的な式であらわしているわけでもないのですけれども、強さは要するに速度の何乗かということが一つ問題です。あとは乱流といいますか、vortex 渦動といいま

すか、そういう強い乱れによるフローパターンを持っている場所の体積と、それから幾何学的なファクターといいますか、そういうちょっとしたほかのファクターとか、そういうものによってきまるといって推定しています。それが wake であるとか、Kalmán の vortex street とか、そういうわりと目で見てわかりやすいパターンとどういうように関係しているかは、まだはっきりと自信を持っていえませんが、わりとスケールの大きい渦の生成・消滅といったことが、とくに intensity の場合に関しては一番メインなファクターになるのじゃないかと思っております。周波数に関しては、下流にいくに従って低くなるということには考え方がいろいろございまして、先生がさっきおっしゃったような考え方のほかにも、あるいは同じことかもしれませんが、私の考えでは、上流で生成されたものうちでわりと低い周波数の成分のものが次々と下流にエネルギー伝達していきまして、一方高周波数の成分も伝達されていきますけれども、徐々にそのエネルギーを失ってしまう。だか

ら下流ではやや低い周波数成分のみが同じレベルで録音すれば出てくるというような考え方を想定しています。

松尾 (阪大第1内科): ちょっとお伺いしたいのは、ドプラーM系列を使っておられるわけですね。どれぐらいのレンジのところを target としておられますか。target の大きさですね。

演者: 一応 6×6×6 ミリです。そういう範囲で断層とM系列との併用で場所設定しまして、そのときのシグナルです。

松尾: ただその場合にドプラーの音と実際の心雑音との周波数スペクトラムが似ていたということなんですけれども……。

演者: 似ている例もあったということです。

松尾: 考えてみますと、心雑音といいますのはその流れの全体の動きの反映ですね。ところがM系列の方はある限局された部分の単なる flow velocity のスペクトラムであるということで、それが心雑音に似ているのがはたしてどういうことを意味しているのか、ちょっと理解に苦しむのですけれども……。

演者: ですから、乱れのひどいようなところを全部総合してやれば、両方の関係が出てくると思いますが、そこまでとても時間がないですし……。

松尾: それからもう1つ、6×6×6 ミリの大きさですとどうかわかりませんが、M系列では本来わり合いその間の velocity が等速の部分が多くて、線スペクトラム様になって、あまり周波数バンドを持たないと思うのですけれども、見せていただいたのはかなり広いバンドを持っております。それはどういうふうに説明したらいいのでしょうか。6ミリといいましても、その間に周辺の減衰がかなりあるので、きちんとそこでおさまっているわけではないと思いますけれども。

演者: M系列の装置については、詳しいことは私よくわかりませんが、その target の volume 内ではいわゆる乱流状態みたいなものにあるということで、全く1つの速度のみを出すという、エコーですね、実際の Doppler 周波数、それを生じな

い状態にあるのじゃないでしょうか。

松尾: directional 方向指示型になっているわけですか。

演者: 方向指示で上下に出て、そしてヘッドホンできくと心雑音と同じ時期にそれが出ているというのはある程度……。

松尾: もし方向指示ですと eddy current でしたら上下にうまく出るので、そういうふうになっているわけなんですか。

演者: ええ、あそこに出した分は方向指示でない分を出したのですけれども、両方向指示をかけて録音しまして……。

松尾: ちょうどミラーのような形に記録されるわけですね。

演者: はい。

田中 (共同研究者): はじめに町井先生のおっしゃっておられたことについてですが、心雑音の発生のメカニズムというのは、いままではたしかにああいった渦巻き流というのでしょうか、eddy が原因であろうといわれてきたのですが、その確たる証拠を誰も示していないわけですね。とくに異常流が起こってその流れに対してどんな障害物がある場合にどういうふうに変化していくかということになると、さらにわからない。とくにVSDのようにうしろから前に向かって流れるような場合は右室壁にもろにぶつかる。ところがAIのように弁口から心尖部に向かって長い経路を伝わって異常流が起こる場合はまた変わってくる。単に乱流ないしは渦巻き流だけで説明できない。結局、心音図学で問題になっている胸壁から心臓の音源までの間、いわゆるブラックボックスになっているところが一番問題になるわけですね。その辺をかなり音響学的な基礎の面から解析していかないと、いわゆる循環器の機能計測法としての心音図の目的が達せられなくなるだろうということで、その辺のブラックボックス的なところをよりはっきりさせていこうということが、今回の1つの研究目的であるわけなんです。それからM系列の問題ですが、分解能は現在のところ、いまも

田中, 柏木, 香坂, 寺沢, 目黒, 引地, 渡辺, 武田

話がありましたように, 大体 $6 \times 6 \times 6$ ミリというのが理想なんですが, あるいはビームの太さによって若干広がっているかもしれません. たしかにM系列法を使いますと, そのくらいの範囲で信号をとらえることができるのですが, その大きさを実際の心臓の中の相対的な広さとの関係でみますと, $6 \times 6 \times 6$ ミリくらいの大きさから $10 \times 10 \times 10$ ミリくらいの範囲でとらえると, 大体目的とする領域での異常な流れの総合的なものがつかまえら

れるだろうというふうなことです. さらに分解能を2ミリ間隔とか, 1ミリの間隔ぐらいにしまして, 流速分布がとれるようになっていけば, また相当変わったデータが出てくると思うのですが, 心音図のそういった基礎の面に少しアプローチしよう, アタックしようということで, こんなことを始めたということでご了解いただければと思います. 第一報でございますので, とっかかりということで, きょうお示しさせていただいたのです.