

超音波フローメータで検出される音響の発生機構について

On the mechanism of generation of detected sound in ultrasonic flow meter

Kato K*, Kido Y*, Motomiya M*, Kaneko Z**, Kotani H**. Memoirs Inst Sci Indust Res 19:51-7, 1962

要約

故里村教授の発明による超音波で管内血流の状態を調べる装置では、その出力電圧は乱流状態にある液体による超音波の反射に起因すると、発明者自身により説明されている。しかし、血管内の血流速の観点から、乱流以外の原因を考える必要がある。本稿は、これが血球によるもので、乱流によるものではないことを確認したものである。

はじめに

故里村教授は、血管に超音波を照射すると、入射波と反射波の複合波が検出され、心拍動に同期するノイズ出力（以下検出音という）が得られる現象を発見した。

彼はこの現象を応用し、非観血的に血管内の血流状態を観測することに成功した。検出音の発生機構は未だ明らかでなく、実験結果を適切に解釈するのみならず、装置の改良にあたっても、この現象を正確に説明することが必要である。里村教授は以下のように説明している。乱流状態では、様々な流速の部分がある。このため、異なる流速の層から音波が反射され、ドプラ効果により周波数変調がおこる。このため入射波と反射波の間で干渉が形成されて検出音となる。彼は乱流状態の水で検出音を実験的に確認している。この実験から、彼は血管中の血流は乱流にあると推測した。しかし、血管中の血流は層流と考えられている。指尖の細い血管でも音が検出され、検出音の原因が乱流以外に考えられないとすれば、指尖の細い血管の流速は非常に大きくなければならない。例えば、指尖の血管径が 50×10^{-3} mmで、レイノルズ数2000で乱流が起こるとすると、流速は 70m/秒以上となる（ここでは血液の粘度は水と同じ 0.018 ポアズとする）。この計算に反して、実測速度はたかだか数 cm/秒である。従って、検出音には乱流以外の原因が考えられる。本稿では、検出音の成因は乱流ではなく血球であるとする著者の仮説を実験的、理論的に示すものである。

実験装置の概要

図1に実験装置のブロック図を示す。高周波発振器のエネルギーは、バリウムチタン製トランスデューサTに送られる。反射波は、受信トランスデューサRが受信し、直接波の一部とともに復調器に送られる。高周波発振器は、出力 1~2W、周波数 5Mc である。音

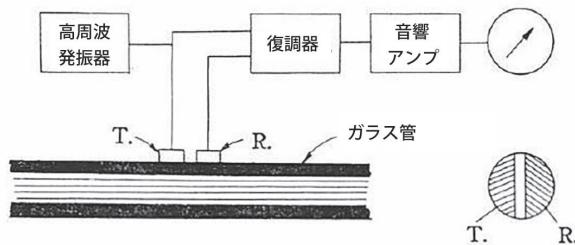


図1. 実験装置のブロック図. T: 送信トランスデューサ, R: 受信トランスデューサ

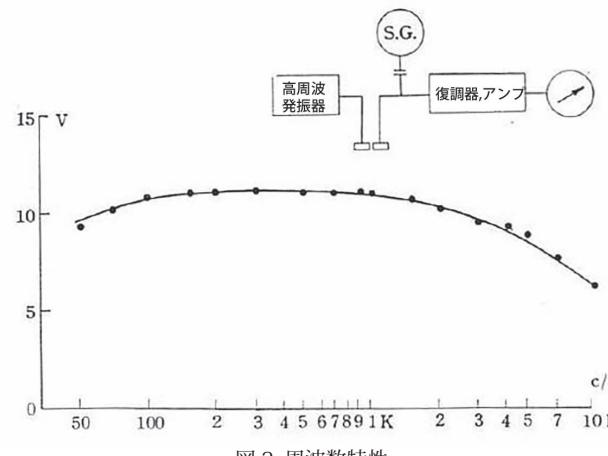


図2. 周波数特性

響アンプの増幅率は約 80dB で、図2のように周波数特性は 50~2000cps でほぼ平坦である。

実験

(a) 検出音の周波数と流速の関係

実験には図1の装置を用いた。ガラス管は、外径 6mm、内径 3.9mm。多数の粒子を含む市販の小麦澱粉の水溶液を血液の代用とした。実験には一貫して澱粉を使用し、最後の実験のみウシの血液を使って澱粉溶液と同じ効果があることを確認した。水は浄化、脱気し、水中の気泡が音源とならないようにする。検出音は、シューというノイズの一種である。図3に、澱粉溶液をガラス管内に 9.3cm/秒で流す時の検出音の周波数成分を示す。縦軸の長さは、一連の 1/3 オクターブのバンドパスフィルター通過後の出力電圧で、数字は各フィルターの中心周波数である。検出音の周波数分布には幅があることから、最大出力を与える周波数を代表値とした。図4に、流速とこの方法で測定した代表周波数の出力の関係を示す。これから検出音の周波数が、流速に比例することがわかる。

(b) 検出音の強度と流速の関係

図5に、澱粉粒子の密度に応じた検出音の出力電圧

*The Institute of Scientific and Industrial Research(産業科学研究所)

**Department of Neuropsychiatry, Osaka University Medical School(大阪大学医学部精神神経科)

と流速の関係を示す。縦軸、横軸はそれぞれ出力電圧、流速を示す。この図から、出力電圧はほぼ一定で、流速に依存しないことがわかる。図6は、ウシの血液による実験結果である。各数値は、生理的食塩水中の血液濃度である。例えば、100, 30は、100cc, 30ccの血液を一定量600ccの生理的食塩水で稀釀したことを意味する。血液の場合の実験結果は、出力電圧が澱粉にくらべて非常に低いので精度は劣るが、それでも出力電圧は基本的に一定で、流速とは無関係である。

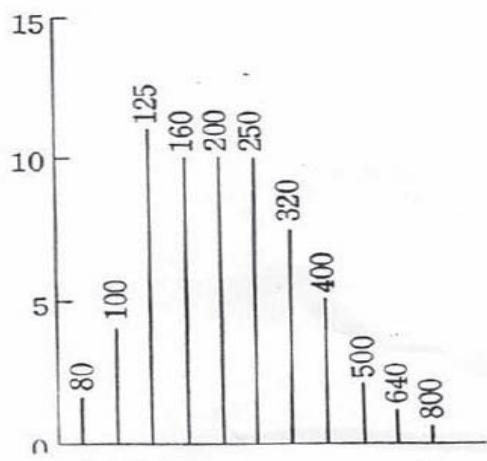


図3. 検出音の周波数分布

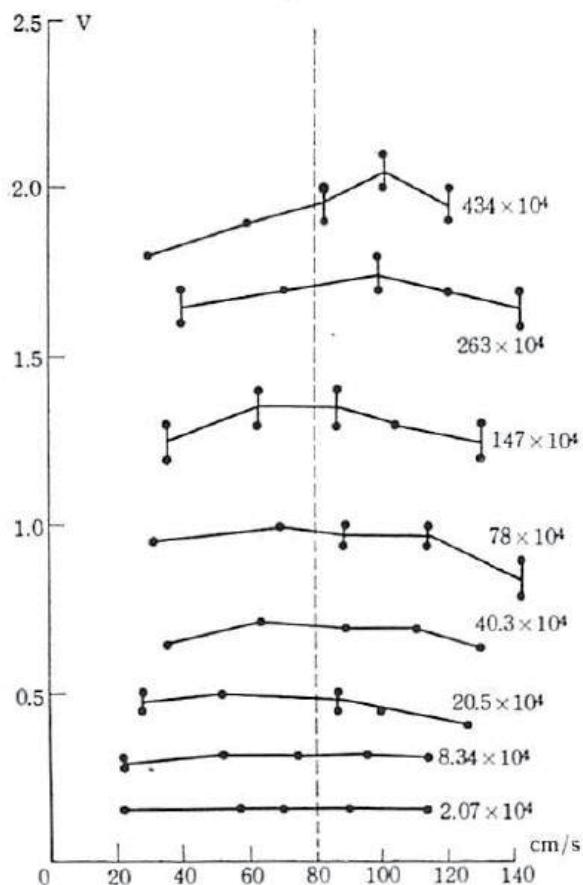


図5. 出力電圧と流速の関係。数値は1cc辺りの澱粉粒子数

(c) 出力と粒子数の関係

上記の実験から、出力電圧と粒子数あるいは血球数が比例することがわかった。図5の一定速度における出力電圧と粒子数の平方根をプロットしたものが図7で、直線が得られる。図8は図6から、図7と同じようにプロットしたものでやはり直線である。これらの事実から、検出音の出力は、溶液中の粒子数の平方根に比例することがわかる。

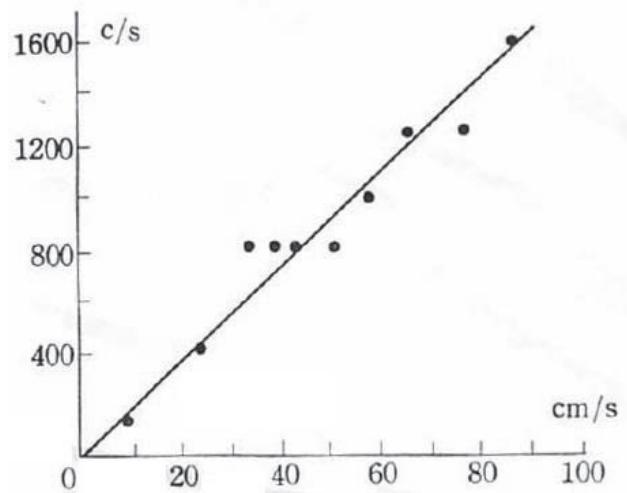


図4. 周波数と流速の関係

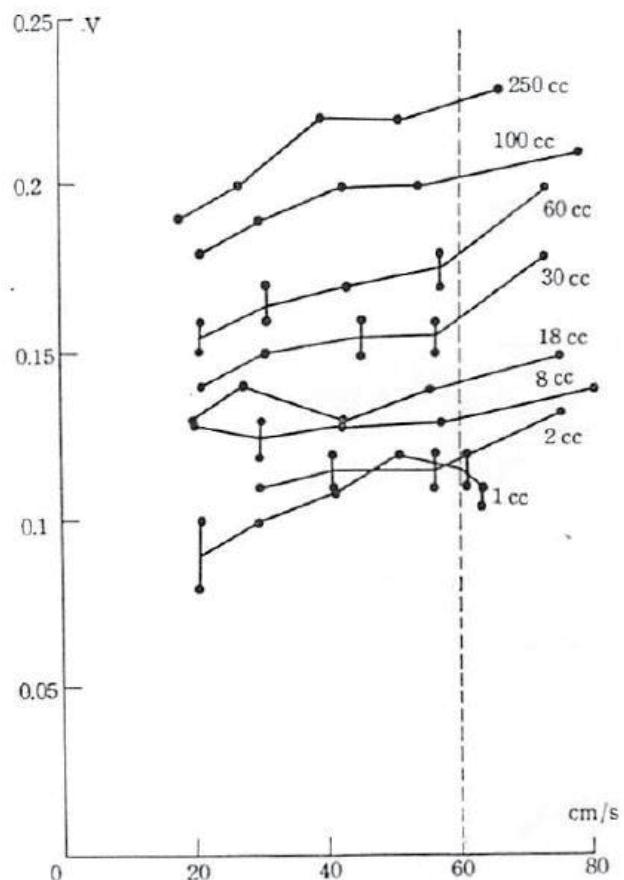


図6. 出力電圧と流速の関係(ウシ血液)

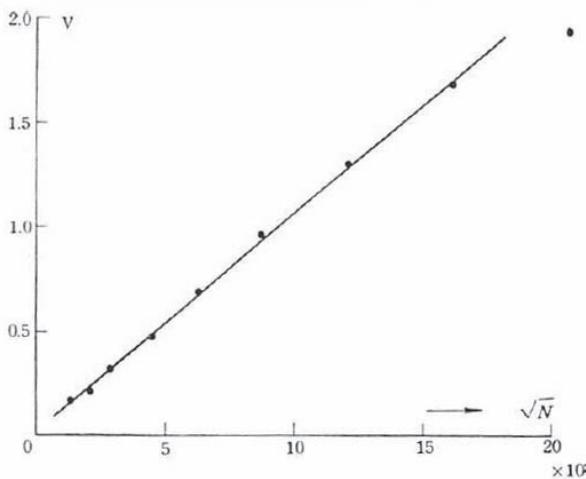


図 7. 出力電圧と粒子数の関係 (澱粉溶液)

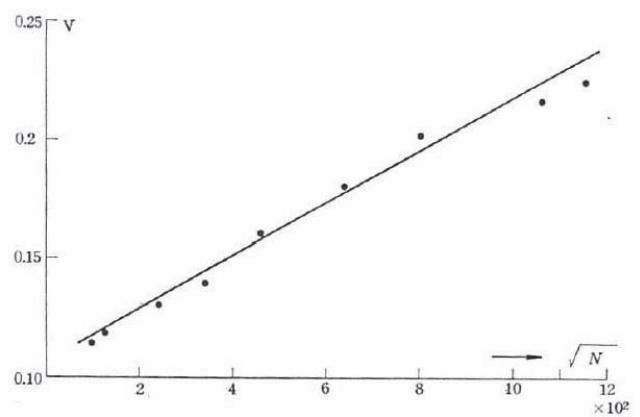


図 8. 出力電圧と粒子数の関係 (ウシ血液)

理論的考察

ここで、検出音は管内を流れる溶液に含まれる粒子からの反射波に起因すると仮定する。

1 個の粒子からの反射波の出力は、 $(\gamma p)^2 / \rho c$ である。ここで超音波に照射される管長を l , l 内の音圧を P とする。

γ : 1 個の粒子の反射係数

n : 1cm^3 あたりの粒子数

s : 管の断面積

v : 流速

ρc : 液体の比音響インピーダンス

1 個の粒子が距離 l を通過する間に反射するエネルギーは、 $\frac{(\gamma p)^2 l}{\rho c v}$ 。単位時間当たりに通過する総粒子数は nsv なので、反射波の強度 (W) は、

$$W = s n v \frac{(\gamma p)^2 l}{\rho c v} = s n l \frac{(\gamma p)^2}{\rho c}$$

反射波の周波数が広範にわたることから、 i 番目の周波数の反射波の音圧と強度を、それぞれ P_i , W_i とする

$$W = \sum_i W_i = \frac{1}{\rho c} \sum_i P_i^2$$

音圧 P_i による受信トランステューサの誘起電圧 V_i は、

$$V_i = k P_i$$

上記の関係から、以下の式が導かれる

$$W = \frac{1}{\rho c} \frac{1}{k^2} \sum_i V_i^2$$

誘起電流 V の実効値は $(\sum V_i^2)^{1/2}$ なので、次のように変形できる。

$$V = k^2 \gamma P \sqrt{s n l}$$

この式は、出力電圧が流速に依存せず、単位体積当たりの粒子数の平方根に比例することを示しており、これは前述の実験結果と完全に一致するものである。

結論

実験および理論的考察から、超音波フローメータの検出音は、移動する粒子からのドプラ効果による周波数変化によるものであることが明らかである。

前述の考察では、簡単のために、管長 l に対して音圧は一定と仮定しているが、音場が音源に非常に近いため、実際には一定ではなく複雑である。このような複雑な場を粒子が通過する場合、反射波は周波数変調だけでなく強度変調を受ける。この現象も、検出音の一因となり得る。いずれにせよ、超音波フローメータの検出音は、血球による音波の反射に起因するものである。

【参考文献】

- 1) S. Satomura, *J. Acous. Soc. Japan*, **15**, 151 (1959)
- 2) S. Satomura, Z. Kaneko, *Proceedings of Third International Conference on Medical Electronics, London*, 1960