

# 超音波ビーム交差造影エコー法による血流速度3次元ベクトル計測

## 研究の概要

本研究の到達目標は、心腔内等の血流速度分布の可視化や肝や腎の血流量の計測をおこなうため、血流速度ベクトルの3次元計測を目標としている。本手法は、3方向から生体内部へ超音波を送波したときに、1方向のプロブで受波されるエコー信号から速度ベクトルを推定するものであり、静注された造影剤（マイクロバブル）の非線形振動を用いることを特徴としている。これまでに以下のような研究を行ってきた。

1. 周波数の異なる2つの超音波ビームの交差領域におけるマイクロバブルの非線形振動による和音および差音の発生の実験的確認
2. ドプラ効果による和音のドプラ周波数と流速ベクトルの定式化
3. 2で得られた関係式の流路ファントム実験による確認

これらの結果から、生体内部の血流に対する3次元流速ベクトル計測の可能性が示唆された。

## 測定原理

本研究は、マイクロバブルに超音波が照射された際に発生する和音ならびに差音成分をエコー信号から抽出し、そのドプラ周波数を計測することによって血流速度をベクトル計測するものである。図1のような配置で超音波を流路に向けて送波した場合、2つの超音波ビームが交差する領域に存在するマイクロバブルは非線形振動を起こし和音を発生する。このとき、上部に配置した振動子で受波されるエコーには和音成分が含まれる。この和音成分によるドプラ周波数 $\Delta f_+$ と第2高調波によるドプラ周波数 $\Delta f$ は流速 $v$ と次式で与えられる。

$$v \cos \theta = \frac{c \Delta f}{2 f_1} \quad v \sin \theta = c \left\{ \left( \frac{1}{2 f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \Delta f - \frac{1}{f_2} \Delta f_+ \right\} \quad (1)$$

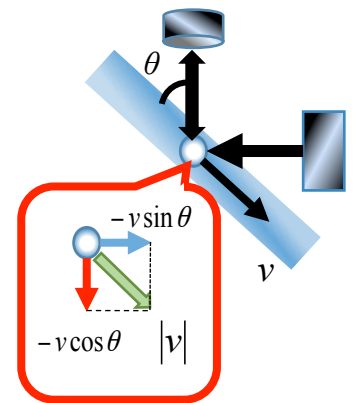


図1 振動子と流路の配置

ここで、 $f_1$ と $f_2$ は、それぞれ、上部の振動子から送波される超音波の周波数と右側に配置される振動子の周波数を表す。上式によって流速ベクトルを推定できる。

## 実験方法

図2に示すような実験システムを構築して、流路を流れるマイクロバブルの速度を測定した。マイクロバブルとして、造影剤として市販されるソナゾイドを用いた。

上部に配置した送受波兼用の凹面振動子を周波数3.2.0 MHz, 20 kPa, 8 cycleのバースト波で駆動させた。流路右側に配置した送波専用の平面振動子を周波数2.0 MHz, 15 V, 10 cycleのバースト波で駆動した。流路は内径4 mmのシリコン製のチューブ内にマイクロバブ

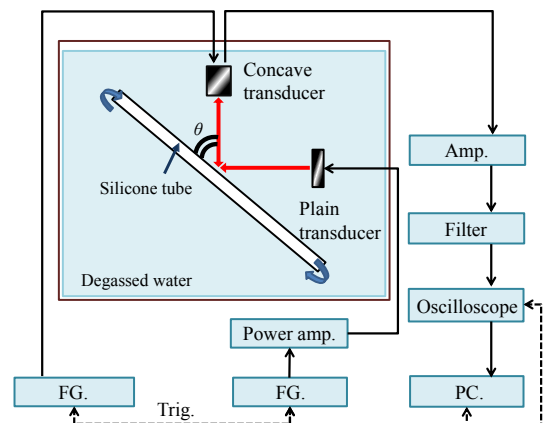


図2 実験システム

ルを注入した脱気水を循環させて構成した。したがって、エコーにおける和音の周波数は 5.2 MHz、第 2 高調波は 6.4 MHz となる。

### 実験結果

図 3 は設定流速値に対する速度ベクトルの絶対値を (1) 式を用いて算出した値をプロットしたものである。図 4 は流路と超音波ビームのなす角度  $\theta$  を変化させた場合の流速の推定値とプロットしたものである。設定流則である 10mm/s に対して誤差率 10% 以内で測定できていることがわかる。これらの結果より (1) 式によって流速が計算できることを確認した。

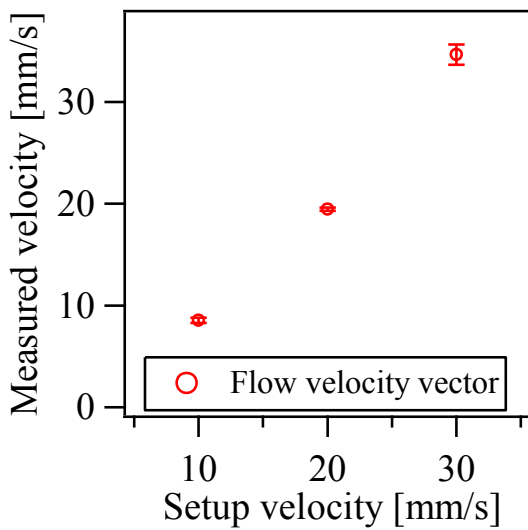


図 3 設定流速値に対する推定値の関係

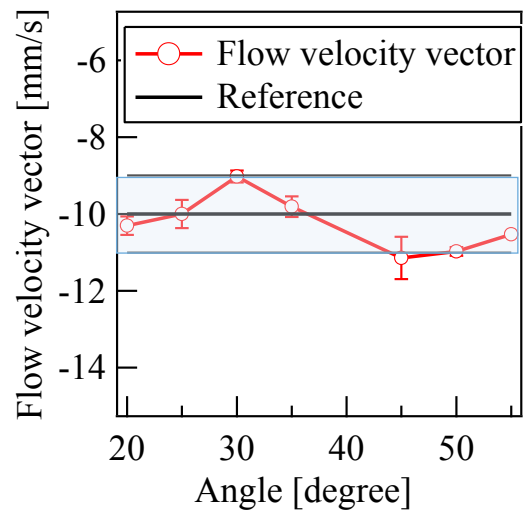


図 4 流路の角度に対する流速測定値の関係

### まとめ

周波数の異なる 2 つの超音波ビームの交差領域におけるマイクロバブルの非線形振動によって発生する和音成分を用いた血流速度ベクトル計測法を提案し、その有効性を流路ファントム実験によって検討した。その結果、和音によるドプラ周波数と第 2 高調波のドプラ周波数から血流速度ベクトルを推定できることを示した。今後は三次元での流速測定の可能性を検討するために実験を行うことが重要であると考えている。三次元ベクトル計測ためには、振動子が 3 つ必要であるため、図 5 のような実験システムを用いて測定を行う予定である。

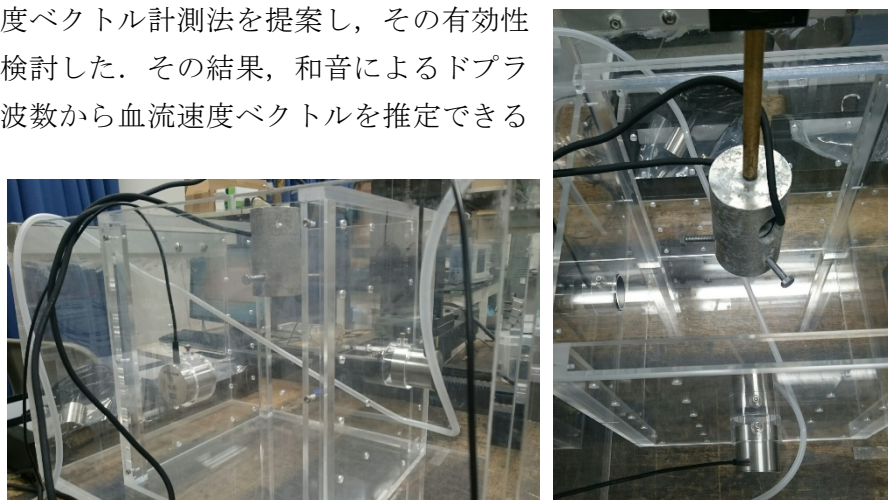


図 5 3次元ベクトル計測システム