

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K15303

研究課題名（和文）スーパーハーモニック心エコーによる3次元血流ベクトルの推定

研究課題名（英文）Estimation of three-dimensional blood flow vector by super-harmonic echocardiography

研究代表者

西條 芳文（SAIJO, Yoshifumi）

東北大学・医工学研究科・教授

研究者番号：00292277

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：広周波数帯域をカバーする64素子セクタプローブを開発し、プログラマブル超音波RF信号取得装置により超音波の送受信を行った。1点の血流を異なる2方向から計測し2次元血流ベクトルを実測するアルゴリズムを確立し、モデル血流計測により妥当性を検証した。さらに、各平面における2次元血流ベクトルを3次元空間の連続の式に適用し、3次元血流ベクトルを推定するアルゴリズムを開発した。

研究成果の概要（英文）：A broadband sector ultrasound probe with 64 elements was developed and ultrasound was emitted and received by a programmable ultrasound RF signal processor. Two-dimensional blood flow velocity was deduced by measuring the blood flow vectors from two different viewpoints. The algorithm was validated by a mock blood flow model. Two-dimensional blood flow information on parallel planes were input in three-dimensional equation of continuity and an algorithm for three-dimensional blood flow measurement was developed.

研究分野：医用イメージング、超音波医学、循環器病学

キーワード：超音波 血流ベクトル 2次元 3次元

1. 研究開始当初の背景

心臓内の血流動態の評価は、弁膜症の重症度だけではなく、心機能の評価にも有効である。研究代表者らは、カラードプラ法に流体力学の諸法則を適用した Echo-Dynamography を用いて左室内の渦流の定量的解析に基づく左室拡張能と収縮能の連関 (日本臨床生理学会誌 42(3):153, 2012) や心筋梗塞における血流と左室壁動態の関係 (J Echocardiogr, 9(1):24, 2011) を明らかにしている。

従来、左室内血流解析法として広く用いられてきたカラードプラ法は、実際には3次元血流ベクトルの超音波ビーム上へ投影した1次元成分の観測面における2次元分布を表示しているに過ぎない。Echo-Dynamography 以外にも、左室壁の動きを考慮した Vector Flow Mapping (VFM) や、コントラスト心エコーの粒子をトラッキングする Echo-PIV (Particle Image Velocimetry) も提案されているが、依然として観測面の2次元血流ベクトルは推測できても、複雑な血流動態を示す左室内3次元血流は計測できていない。現時点で唯一3次元血流ベクトルを計測可能とされる位相コントラスト MR アンジオグラフィは、空間的・時間的平均としての血流しか計測できず、左室内の急速な血流変化や微細な血流情報の計測には向いていない。ここに、左室内3次元血流ベクトルをリアルタイムで計測可能な手法の確立が必要とされてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、臨床心エコーに応用可能なプローブの形状、周波数、アプローチ、計測時間で3次元血流ベクトルを推定する手法を開発することである。拡散波の parallel beamforming (PBF) により仮想的に異なる音源を設定し、異なる視点から血流を計測することで、2次元血流ベクトルを (推定ではなく) 実測するアルゴリズムを確立する。

さらに、実測された2次元血流ベクトルを3次元空間の連続の式に適用し、観測面に直交する方向の血流成分を算出することで、3次元血流ベクトルを推定するアルゴリズムを開発する。

最後に、モデル血流を用いて本手法の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

図1に示すように、異なる方向から計測された同一点の血流速度成分を、それぞれ v_1 、 v_2 とし、2次元血流ベクトル V の x 軸成分を V_x 、 y 軸成分を V_y とすると、

$$V_x = \frac{v_2 - v_1}{2\sin(\pi \cdot \theta / 180)}$$

$$V_y = \frac{v_2 + v_1}{2\cos(\pi \cdot \theta / 180)}$$

という式から2次元血流ベクトルを求めることができる。

また、拡散波を用いた PBF では、2つの異なる仮想点音源から血流成分を計測することが可能であり、多角形の領域は左心室全体をカバーできるので、左心室内の2次元血流分布を求めることが可能である。

実際の計測には特注の64素子セクタプローブを用い、プログラブル超音波 RF 信号取得装置 (Vantage, Verasonics 社製) を用いて、超音波の送受信を行った。

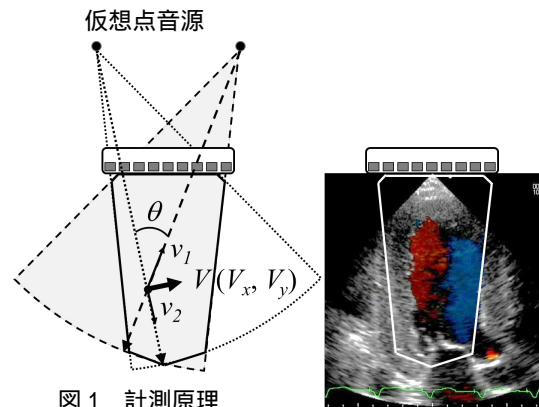


図1 計測原理

Echo-Dynamography は、カラードプラ心エコーによって観測した2次元平面で完結する流れ (= 渦流) と観測面外から流入し、観測面を流れ、観測面外に流出する基本流を分離することを基本原理としている。本研究では、観測面内の2次元血流成分は既知であり、以下の3次元空間における連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

に、2次元血流成分を代入することで、観測面に垂直な血流成分を推定し、観測面における3次元血流ベクトル分布を推定する。

4. 研究成果

図2に示すように、直線パイプに定常流ポンプを用いて血液ファントムを流し、開発したセクタ型プローブにより超音波計測を行った。

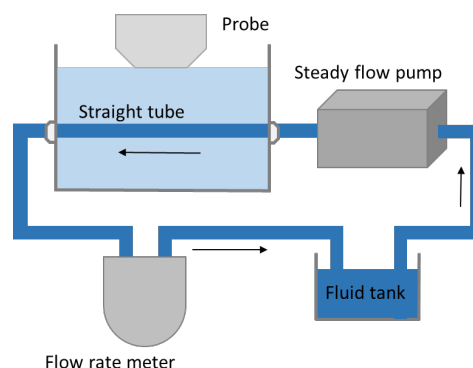


図2 血流モデル

図3上に示すように、超音波Bモード像および2つの仮想点音源から計測した血流情報に基づく2次元ベクトルを重畳表示した。図3下は、拡大表示であり、超音波ビーム送信方向にほぼ垂直方向のベクトルが表示され、計測の妥当性が証明された。

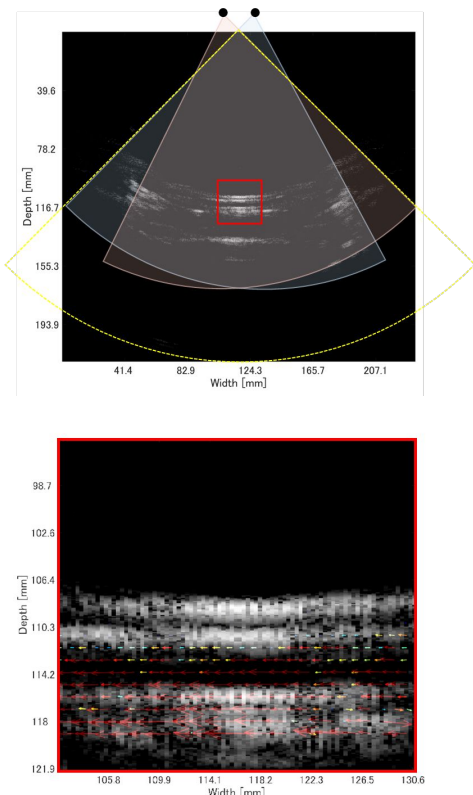


図3 Bモード画像と2次元血流ベクトルの重畳表示

図4に示すように平行な多断面の計測面を想定し、2次元血流データの3次元化に関するシミュレーションを行った。

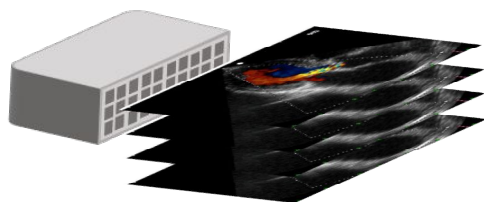


図4 2次元血流ベクトルの多断面計測

血流シミュレーションにより3次元噴流モデルを作製し、XYZ軸上に位置と3次元血流ベクトルをプロットした。

各ZにおけるXY平面に投影した3次元ベクトルを、超音波計測により求めた2次元血

流ベクトルとみなし、各XY平面の計測データに連続の式を適用し、XY平面に垂直なZ方向のベクトルを導出した。その結果を元データと比較することで、手法の妥当性を検討した。

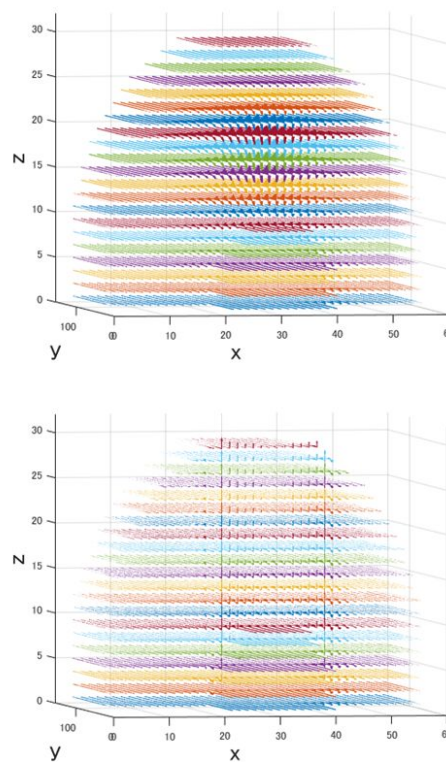


図5 上:シミュレーションにより求めた噴流の3次元血流データ(真値)
下:平行な多断面の2次元血流データに連続の式を適用した3次元血流(計算値)

図5上がシミュレーションにより求めた噴流の3次元血流データ(真値)で、下が平行な多断面の2次元血流データに連続の式を適用した3次元血流(計算値)がある。境界域に誤差は存在するものの、実際の超音波計測範囲と想定される1cm程度の範囲では、連続の式によるZ方向の血流成分が推定可能なことが示された。

以上の研究成果により、臨床心エコーに応用可能なプローブの形状、周波数、アプローチ、計測時間で3次元血流ベクトルを推定する手法の開発に成功した。今後は産学連携により超音波データ取得装置を開発し、3次元血流計測システムの実用化に向けたステップのプロジェクトを推進していく予定である。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

Nagaoka R, Sasaki K, Zama S, Nagone M, Nagai H, Takeuchi Y, Saijo Y. Perspective imaging of flow in arterial model obtained with continuous wave Doppler focusing technique, 査読有, Conf Proc 38th IEEE Eng Med Biol Soc, pp. 2315-19, 2016.

DOI: 10.1109/EMBC.2016.7591193

Nagaoka R, Kobayashi K, Yoshizawa S, Umemura S, Saijo Y. Intrinsic elastography and its dependence on arterial flow volume, 査読有, Conf Proc 37th IEEE Eng Med Biol Soc, pp. 6309-12, 2015.

DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319835

Nagaoka R, Masuno G, Kobayashi K, Yoshizawa S, Umemura S, Saijo Y. Measurement of regional pulse-wave velocity using spatial compound imaging of the common carotid artery in vivo, 査読有, Ultrasonics, No. 55, pp. 92-103, 2015.

DOI: 10.1016/j.ultras.2014.07.018

〔学会発表〕(計3件)

赤川紀, 長岡亮, 深津幸助, 西條芳文. 高フレームカラー Doppler 画像のイメージプロセッシングに関する研究. 第 18 回日本栓子検出と治療学会. 2015 年 9 月 26 日, 宇都宮 (栃木県総合文化センター).

深津幸助, 赤川紀, 長岡亮, 西條芳文. 粒子画像速度計測を用いた頸動脈二分岐モデルにおける速度ベクトル分布推定. 第 18 回日本栓子検出と治療学会. 2015 年 9 月 26 日, 宇都宮 (栃木県総合文化センター).

Akagawa O, Fukazu K, Nagaoka R, Saijo Y. Two-dimensional blood flow vector and wall shear stress of carotid artery obtained with dual-angle Doppler method. 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium, September 19, 2016, Tours, France.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
西條研ホームページ

<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/imaging/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西條 芳文 (SAIJO, Yoshifumi)

東北大学・大学院医工学研究科・教授

研究者番号: 00292277

(2) 研究分担者

長谷川 英之 (HASEGAWA, Hideyuki)

富山大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号: 00344698

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし