

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289123

研究課題名(和文) 超高速イメージングのための高出力超音波プローブの開発

研究課題名(英文) Development of High-Output Ultrasonic Probe for Ultrafast Imaging

研究代表者

長谷川 英之 (Hasegawa, Hideyuki)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：00344698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：超音波による機能イメージングは循環器系疾患の診断に有用であり、その機能評価のためには組織動態計測が必須である。組織動態の高精度計測のため、本申請者は超音波断層法の長所である時間分解能を向上させる手法の開発に取り組んできた。本研究では、より高出力の超音波を照射し血球など散乱強度が小さい対象からの超音波エコーを検出するため、高い電圧を印加できる配列型超音波プローブの開発を行った。また、超音波プローブへの電気的入力も増強する必要があるため、多チャンネル高出力送信回路の開発も行った。さらに、受信信号の高コントラスト化手法なども開発し、血球からの超音波エコーを超高速に描出することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Functional ultrasound imaging is valuable for diagnosis of the circulatory system. Measurement of the tissue dynamics is necessary for functional ultrasound imaging. We have tried to improve the temporal resolution, which is one of the merits of ultrasonography, for accurate measurement of the tissue dynamics. In the present study, an ultrasonic transducer array, to which high input voltage can be applied, was developed for detection of ultrasonic echoes from very weak scatterers, such as blood cells, by increasing the intensity of emitted ultrasound. Also, a multi-channel system for ultrasonic pulse-echo measurement was developed so that high voltages can be applied to the transducer array. Furthermore, we have developed methods for high-contrast ultrasonic imaging and succeeded to visualize weak echoes from blood cells.

研究分野：医用超音波工学

キーワード：超音波 高速イメージング 高出力プローブ

1. 研究開始当初の背景

循環器系疾患は我が国における死因の3割近くを占め、その高精度診断は重要な課題である。循環器系は動的な器官であり、その機能評価のためには動態計測が必須であるため、本申請者は、超音波断層法の長所である時間分解能を向上させる手法の開発に取り組んできた。

これまでの研究開発において、本申請者はまず、循環器系疾患の原因となる動脈硬化症の診断方法に関する検討を行った。心筋梗塞や脳梗塞などの疾患は、動脈硬化性病変が破綻し、その際に発生した血栓が冠動脈や脳血管を閉塞させることにより発症する。動脈硬化性病変により血管内腔が狭くなると血流が乱れて乱流が発生し、それにより惹起される動脈壁・病変の高周振動(100 Hz以上)が病変破裂に影響している、という知見があるが、従来の超音波診断における時間分解能(フレームレート)は数十 Hz であるため、このような速い(周波数の高い)現象を捉えることができない。この問題を解決するため本申請者は、血管の超音波イメージングのフレームレートを従来の数十 Hz から 3,000 Hz 以上に飛躍的に向上させることに成功し、この超高速イメージング法と合わせて血流と血管壁の動態を高時間分解能で解析する手法を開発した。また、球面拡散波を用いて他の臓器にも適用可能とした。

しかし、球面拡散波を用いた超高速イメージング法では、扇形の領域に超音波を照射するため送信超音波を拡散させている。この場合、超音波を集束させる場合に比べ超音波音圧が大きく低下する。したがって、散乱強度の大きい軟組織からのエコーは検出できるものの、散乱強度が小さい血球からのエコーは非常に微弱となってしまう、検出が難しい。これは、現状の超音波送受信器の性能によるところが大きい。

2. 研究の目的

現在の超音波診断装置は、送信超音波を集束する場合を想定しており、その条件下で生体からの反射・散乱エコーが得られるよう、安全基準を考慮しながら出力が調整されている。超音波を集束させた場合は、現在の超音波送受信器(超音波プローブ)により安全基準 720 mW/cm^2 程度までの音響出力が可能であるが、拡散ビームの場合には 10 mW/cm^2 までしか出力できない。したがって、エネルギーで 72 倍、超音波音圧で $(72)^{1/2} = 8.5$ 倍の余裕があるが利用できておらず、血球のように散乱強度が小さい対象からのエコーは検出が難しいのが現状である。

このような課題を解決するため、本研究では、高い超音波出力を可能とするアレイ型超音波プローブの開発を行う。また、高い音響出力を実現するためには超音波プローブへの電気的入力も増強する必要があるため、高出力超音波プローブ用の多チャンネル高出

力送信回路の開発も行い、血球など散乱強度が小さい対象からの超音波エコーの検出を実現する。

3. 研究の方法

圧電振動子により発生する超音波の強度を高めるためには、圧電振動子への印加電圧を上昇させる必要がある。しかし、圧電振動子への印加電圧を高くすると発熱などの問題が発生する。本研究では、超音波プローブの構造を単純化し、放熱性を向上させることで、圧電振動子への印加可能電圧を向上させる。

また、圧電振動子へ高周波電圧を印加するための既設の 96 チャンネル超音波送受信システムについて、電源を増強することにより出力可能電圧を向上させる。

さらに、高速超音波イメージングにおいては、送信には従来の集束ビームではなく平面波や球面拡散波などの非集束ビームを用いるため、不要エコーが増加する。本研究では、受信エコーを解析することにより適応的に不要エコーを抑圧する手法を開発する。

これらの手法をもとに、血液(おもに赤血球)からの超音波エコー信号を描出し、血流画像の構築を試みる。

4. 研究成果

本研究では、96 チャンネルの配列型超音波プローブを製作した。構造を単純化することにより、印加可能電圧は 250 V の高電圧を達成している。また、本プローブを用いて超音波を送受信するための 96 チャンネル送受信システムは、電源を増強することにより、85 Vpp から 170 Vpp まで出力電圧を向上させることに成功した。

開発した超音波プローブおよび送受信システムを用いて高速超音波イメージングモード(撮像速度最大約 6000 フレーム毎秒)で測定される超音波エコー信号を用いて、高コントラストな超音波断層像を構築するための手法を開発した。

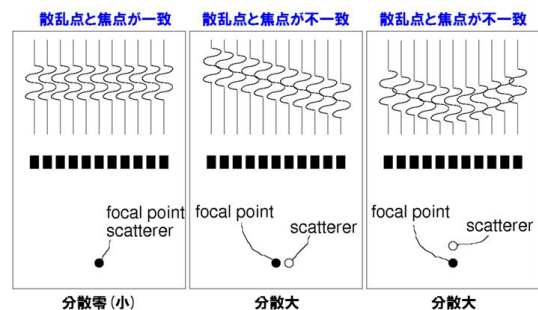


図 1: 超音波プローブの素子(圧電振動子)で受信した信号の模式図。(左) 受信焦点位置と超音波散乱体位置が一致する場合。(中央) 受信焦点位置が超音波散乱体位置から水平方向にずれた場合。(右) 受信焦点位置が超音波散乱体位置から垂直方向にずれた場合。

図1は、不要エコー抑圧法の原理を説明した図である。超音波プローブの各素子(圧電振動子)で受信した信号は、超音波散乱源の位置から各素子までに距離に応じて遅延して受信される。受信ビームフォーミングでは、設定した受信焦点位置から各素子までの距離に応じた遅延時間により受信信号の遅延を相殺する。そのため、超音波散乱体位置と受信焦点位置が一致する場合(図1左)、各素子で受信した信号は時間的に揃ったものとなる。つまり、素子の配列方向に受信信号の位相が揃うことになる。この場合は、受信した超音波信号が受信焦点位置から発生したものであり、強調すべき信号(所望信号)である。一方、図1(中央)および図1(右)に示すように、超音波散乱体波が、受信焦点からずれた点から発生する場合、その受信信号は抑圧されるべき不要信号である。

本研究では、所望信号と不要信号のこのような違いを利用して超音波断層像のコントラストを向上させる手法を開発した。具体的には、所望信号の場合は、受信信号の素子配列方向の位相分散が小さく、不要信号の場合は位相分散が大きいことを利用している。

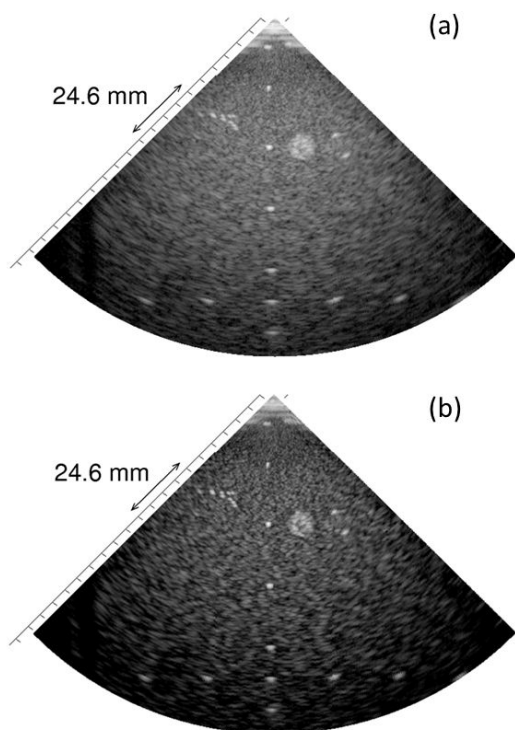


図2: 超音波画像評価用ファントムの超音波断層像。(a) 従来のビームフォーミング法により得られた超音波断層像。(b) 本研究で開発した高コントラスト化手法を用いて得られた超音波断層像。

図2は、超音波断層像の画質評価用に用いられるファントムの超音波断層像である。図2(a)の従来法による断層像に比べ、コントラストが向上していることが分かる。また、点散乱体からのエコーから、空間分解能も向上していることが分かる。



図3: 心臓の超音波断層像。(a) 測定断面の模式図。(b) 超高速イメージングにより得られた心臓の超音波断層像(6250 フレーム毎秒)。(c) 高域通過フィルタ後の超音波断層像。

以上のように開発したイメージングシステム・手法をもとに計測した心臓の超音波断層像を図3に示す。図3(a)に模式的に示すように、心尖部方向から断層像を測定した。図3(b)は球面拡散送信波を用いた高速イメージングにより得られた心臓の超音波断層像であり、撮像速度は6250 フレーム毎秒である。血液の流れは心筋などの組織の動きに比べて早いため、受信信号の時間方向の変動周波数が高い。したがって、時間方向に高域通過フィルタをかけることにより、移動速度の大きい対象からのエコーのみを抽出したものが図3(c)である。図3(c)の左室内腔に、大動脈に駆出される血球からのエコーが描

出されている 図3の結果に示されるように、開発したシステム・手法により、心臓内腔の血球からのエコーを超高速に描出することができ、血流動態を観察することが可能となった。

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 19 件)

1. Hideyuki Hasegawa, "Apodized adaptive beamformer," *Journal of Medical Ultrasonics*, vol. 44, no. 2, pp. 155-165, April 2017. 10.1007/s10396-016-0764-3
2. Motonao Tanaka, Tsuguya Sakamoto, Shigeo Sugawara, Yoshiaki Katahira, Kaoru Hasegawa, Hiroyuki Nakajima, Takafumi Kurokawa, Hiroshi Kanai, and Hideyuki Hasegawa, "Deformability of the pulsating left ventricular wall: A new aspect elucidated by high resolution ultrasonic methods," *Journal of Cardiology*, vol. 69, no. 2, pp. 462-470, February 2017. 10.1016/j.jjcc.2016.02.009
3. Hideyuki Hasegawa, "Improvement of penetration of modified amplitude and phase estimation beamformer," *Journal of Medical Ultrasonics*, vol. 44, no. 1, pp. 3-11, January 2017. 10.1007/s10396-016-0731-z
4. Rimujo Hendradi, Achmad Arifin, Hiro Shida, Suhendar Gunawan, Mauridhi Hery Purnomo, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Analysis and methods to test classification of normal and pathological heart sound signals," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 90, No. 1, pp. 222-236, 15th August 2016. <http://www.jatit.org/volumes/ninety1.php>
5. Hideyuki Hasegawa and Chris L. de Korte, "Impact of element pitch on synthetic aperture ultrasound imaging," *Journal of Medical Ultrasonics*, vol. 43, no. 3, pp. 317-325, July 2016. 10.1007/s10396-016-0700-6
6. Hideyuki Hasegawa, Masakazu Sato, and Takasuke Irie, "High resolution wavenumber analysis for investigation of arterial pulse wave propagation," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 7S1, pp. 07KF01-1-7, July 2016. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.55.07KF01>
7. Hideyuki Hasegawa, "Phase-sensitive 2D motion estimators using frequency spectra of ultrasonic echoes," *Applied Sciences*, vol. 6, no. 7, pp. 195-1-19, June 30, 2016. 10.3390/app6070195
8. 宮下 進, 室月 淳, 室本 仁, 小澤克典, 長谷川英之, 金井 浩, "位相差トラック法," *超音波医学*, vol. 43, no. 3, pp. 483-490, May 2016. 10.3179/jjmu.JJMU.R.63
9. 長谷川英之, "ドプラ法の原理と応用," *超音波医学*, vol. 43, no. 3, pp. 411-415, May 2016. 10.3179/jjmu.JJMU.R.81
10. R. Hendradi, A. Arifin, H. Shida, S. Gunawan, M. H. Purnomo, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Signal processing and extensive characterization method of heart sounds based on wavelet analysis," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 55-68, January 2016. 10.15866/iree.v11i1.8138
11. Hideyuki Hasegawa, "Enhancing effect of phase coherence factor for improvement of spatial resolution in ultrasonic imaging," *Journal of Medical Ultrasonics*, vol. 43, no. 1, pp. 19-27, January 2016. 10.1007/s10396-015-0673-x
12. Katsusuke Ozawa, Jun Murotsuki, Susumu Miyashita, Jin Muromoto, Hideyuki Hasegawa, Hiroshi Kanai, and Nobuo Yaegashi, "Assessing fetal cardiac function by measuring myocardial radial velocity using the phased-tracking method," *Fetal Diagnosis and Therapy*, vol. 38, no. 2, pp. 126-134, August 2015. 10.1159/000371514
13. Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Temporal averaging of two-dimensional correlation functions for velocity vector imaging of cardiac blood flow," *Journal of Medical Ultrasonics*, vol. 42, no. 3, pp. 323-330, July 2015. 10.1007/s10396-015-0620-x
14. Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Echo motion imaging with adaptive clutter filter for assessment of cardiac blood flow," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, no. 7, pp. 07HF09-1-8, June 2015. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.07HF09>
15. Takuma Oguri, Kazuki Tamura, Kenji Yoshida, Jonathan Mamou, Hideyuki Hasegawa, Hitoshi Maruyama, Hiroyuki Hachiya, and Tadashi Yamaguchi, "Estimation of scatterer size and acoustic concentration in sound field produced by linear phased array transducer," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, no. 7, pp. 07HF014-1-5, June 2015. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.07HF014-1-5>

16. Yukiya Miyachi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Automated detection of arterial wall boundaries based on correlation between adjacent receive scan lines for elasticity imaging," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 54, no. 7, pp. 07HF18-1-11, June 2015. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.07HF18>
 17. Susumu Miyashita, Jun Murotsuki, Jin Muromoto, Katsusuke Ozawa, Nobuo Yaegashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Measurement of internal diameter changes and pulse wave velocity in fetal descending aorta using the ultrasonic phased-tracking method in normal and growth-restricted fetuses," Ultrasound in Medicine and Biology, vol. 41, no. 5, pp. 1311-1319, May 2015. 10.1016/j.ultrasmedbio.2014.12.008
 18. Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "Effect of element directivity on adaptive beamforming applied to high-frame-rate ultrasound," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 62, no. 3, pp. 511-523, 2015.
 19. Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "Effect of sub-aperture beamforming on phase coherence imaging," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 61, no. 11, pp. 1779-1790, 2014.
- [学会発表](計 33 件)
1. 鍋木かおり, 長谷川英之, "フェーズドアレイプローブを用いた2次元変位計測法に関する検討,"日本音響学会講演論文集, pp. 965-966, 生田, March 15-17, 2017.
 2. 皆川真聖, 長谷川英之, 八木晋一, "粒子速度の位相を用いたせん断波伝搬速度の2次元推定に関する検討," 日本音響学会講演論文集, pp. 1069-1070, 生田, March 15-17, 2017.
 3. 藤田博樹, 長谷川英之, "超音波パルス圧縮における方位分解能に関する検討,"日本音響学会講演論文集, pp. 1073-1074, 生田, March 15-17, 2017.
 4. 長谷川英之, "超音波イメージングにおける距離分解能向上に関する検討," 日本音響学会講演論文集, pp. 1127-1128, 生田, March 15-17, 2017.
 5. 宮條 晃, 長谷川英之, "受信超音波信号の位相偏移と周波数の推定による血管壁2次元変位の高精度計測," 日本音響学会講演論文集, pp. 1129-1130, 生田, March 15-17, 2017.
 6. Hiroki Fujita and Hideyuki Hasegawa, "Investigation on a method for suppression of grating lobe by controlling waveform of transmitted ultrasound," The 37th Symposium on Ultrasonic Electronics, 1P5-5, Busan, Korea, November 16-18, 2015.
 7. Hideyuki Hasegawa, "Study on improvement of spatial resolution in element domain for high-frame-rate ultrasound," The 37th Symposium on Ultrasonic Electronics, 1P5-6, Busan, Korea, November 16-18, 2015.
 8. 長谷川英之, "複素粒子速度の解析によるせん断波伝搬速度の推定," 電子情報通信学会技術報告, vol. 116, no. 288, pp. 1-5, 浜松, November 7, 2016.
 9. 長谷川英之, "超音波による医療用イメージング," 第25回ソノケミストリー討論会講演論文集, pp. 112-113, 富山, October 21-22, 2016 (招待講演).
 10. 長谷川英之, "適応ビームフォーマにおける開口分割と空間平均の併用手法," 電子情報通信学会技術報告, vol. 116, no. 241, pp. 7-10, 郡山, October 7, 2016.
 11. 長谷川英之, "適応ビームフォーマにおける開口分割と空間平均の効果," 2016年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ/NOLTA ソサイエティ大会講演論文集, p. 49, 札幌, September 20-23, 2016.
 12. 藤田博樹, 長谷川英之, "グレーティングローブを抑圧する超音波送信波形の検討," 日本音響学会講演論文集, pp. 1053-1054, 富山, September 14-16, 2016.
 13. 長谷川英之, "超音波エコーの周波数および時間変化の推定による対象物の2次元速度検出," 日本超音波医学会 基礎技術研究会資料, vol. 2016, no. 3, pp. 54-58, 札幌, August 6, 2016.
 14. 長谷川英之, "低周波超音波イメージングの基礎的検討," 電子情報通信学会技術報告, vol. 116, no. 84, pp. 1-4, 富山, June 10, 2016.
 15. 長谷川英之, "超音波ドブラ法の基礎," Newlosology, vol. 29, no. supplement, p. 60, 横浜, June 3-4, 2016 (招待講演).
 16. 高橋広樹, Magnus Cinthio, 長谷川英之, "高速超音波イメージングを用いた循環動態計測," 超音波医学, vol. 43, no. supplement, p. S243, 京都, May 27-29, 2016.
 17. 長谷川英之, 八木晋一, "高速イメージングによる心拍に伴う肝臓内ずり波伝搬計測," 超音波医学, vol. 43, no. supplement, p. S547, 京都, May 27-29, 2016.
 18. 鍋木かおり, 長谷川英之, "心臓壁の運動計測精度向上を目指した相関窓の実効位置推定に関する基礎研究," 超音波医学, vol. 43, no. supplement, p. S552, 京都, May 27-29, 2016.
 19. 長谷川英之, "素子指向性を考慮した適

- 応ビームフォーマにおける対角項負荷と空間平均の効果," 超音波医学, vol. 43, no. supplement, p. S553, 京都, May 27-29, 2016.
20. 鍋木かおり, 長谷川英之, "心筋ストレインレート計測のための相関窓の実効位置を用いた推定法," 生体医工学, vol. 54, no. suppl., p. 179, 富山, April 26-28, 2016.
21. 高橋広樹, シンシオ マグナス, 長谷川英之, "二次元位相勾配検出による心腔内血流速度ベクトル計測の計算量低減," 日本音響学会講演論文集, pp. 1337-1340, 横浜, March 9-11, 2016.
22. 長谷川英之, 佐藤正和, 入江喬介, "局所脈波速度計測における波長可視化法の検討," 日本音響学会講演論文集, pp. 1343-1344, 横浜, March 9-11, 2016.
23. 鍋木かおり, 長谷川英之, "相関窓の実効位置推定による心筋ストレインレート計測精度の向上," 日本音響学会講演論文集, pp. 1349-1350, 横浜, March 9-11, 2016.
24. 高橋広樹, シンシオ マグナス, 鍋木かおり, 米井浩平, 長谷川英之, "頸動脈壁の二次元変位推定における相関多重平均の効果," 日本音響学会講演論文集, pp. 1273-1276, 横浜, March 9-11, 2016.
25. 米井浩平, 鍋木かおり, 高橋広樹, 長谷川英之, "超音波エコーの周波数解析による対象物の二次元変位推定法に関する検討," 電子情報通信学会技術報告, vol. 115, no. 464, pp. 51-54, 東京, February 29, 2016.
26. 長谷川英之, 佐藤正和, 入江喬介, "高速超音波イメージングにより計測した動脈壁振動波形の解析," 日本超音波医学会基礎技術研究会資料, vol. 2015, no. 5, pp. 25-28, 横浜, December 4, 2015.
27. Hideyuki Hasegawa, "Separation of forward and reflected pulse waves in carotid artery using directional filter," The 36th Symposium on Ultrasonic Electronics, 3P5-7, Tsukuba, Japan, November 5-7, 2015.
28. Hiroki Takahashi, Magnus Cinthio, and Hideyuki Hasegawa, "Improvement of accuracy and computational efficiency in intracardiac blood velocity estimation," The 36th Symposium on Ultrasonic Electronics, 3P5-11, Tsukuba, Japan, November 5-7, 2015.
29. 長谷川英之, 金井 浩, "適応ビームフォーマによる平面波高速イメージングの高分解能化~集束ビームを用いた場合との比較~, " 電子情報通信学会技術報告, vol. 115, no. 246, pp. 19-22, 金沢, October 9, 2015.
30. 長谷川英之, 金井 浩, "素子指向性を考慮した適応ビームフォーマ," 超音波医

学, vol. 42, no. suppl., p. S490, 東京, May 22-24, 2015.

31. 高橋広樹, 長谷川英之, 金井 浩, "高フレームレート心臓超音波を用いた心腔内の血流速度ベクトルイメージング," 超音波医学, vol. 42, no. suppl., p. S468, 東京, May 22-24, 2015.
32. 長谷川英之, 金井 浩, "超音波による定量診断: 血管壁の弾性特性計測," 超音波医学, vol. 42, no. suppl., p. S221, 東京, May 22-24, 2015.
33. 長谷川英之, 金井 浩, "高速超音波イメージングを用いた心血管系動態の計測," 生体医工学, vol. 53, no. suppl. 1, 名古屋, May 7-9, 2015.

〔図書〕(計2件)

1. Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, Fast cardiac blood flow imaging by visualization of ultrasonic echoes from blood particles; Hideyuki Hasegawa, Yuji Sato, and Hiroshi Kanai, High frame rate echocardiography using virtual point source moving in front of array, Acoustical Imaging Volume 32, Research Publishing, Singapore, (2015) pp. 119-122, 123-127.
2. Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, Ultrasonic Methods for Measurement of Small Motion and Deformation of Biological Tissues for Assessment of Viscoelasticity, ASME Press (2014), New York.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www3.u-toyama.ac.jp/hase/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 英之 (HASEGAWA, Hideyuki)
富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授
研究者番号: 00344698

(2) 研究分担者

金井 浩 (KANAI, Hiroshi)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10185895

近藤 祐司 (Kondo Yuji)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20534431

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