

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 4 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13995

研究課題名(和文) 小型超音波診断装置のための2共振超音波振動子と革新的送受信法の開発

研究課題名(英文) Developments of ultrasonic transducer with two resonance frequencies and innovative transmit-receive method for small-scale ultrasonic diagnostic equipment

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年の技術革新により、超音波診断装置の性能向上が著しい。一方、救急や遠隔医療などに対応するための小型・携帯用の超音波診断装置も望まれており、近年は携帯用機種の開発も進んでいる。現在の携帯型診断装置は、1つの超音波プローブで体内全ての深さをカバーするために深達度の高い低周波超音波を用いているが、低周波超音波では表在組織の観察に不向きである。本研究では、1つの超音波プローブで体深部・表在いずれも観察可能とすることを目的とし、基本周波数およびその2倍の周波数の超音波が送受信可能な、2共振超音波振動子を開発するとともに、その振動子を用いたイメージング方法について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：The performance of ultrasonic diagnostic equipment is rapidly improving owing to recent innovative developments of ultrasound-related devices. On the other hand, portable equipment is demanded for remote or emergency medical care. A current portable ultrasound system equips only one ultrasonic probe for portability. Therefore, it is necessary to use low-frequency ultrasound to image both superficial and deep organs using a single ultrasonic probe. However, low-frequency ultrasound is not preferable for imaging of superficial organs. In this study, an ultrasonic transducer, which oscillated at two frequencies (fundamental and harmonic), was developed. Also, ultrasound imaging using the developed ultrasonic transducer was conducted.

研究分野：医用超音波工学

キーワード：超音波 小型診断装置 超音波振動子

1. 研究開始当初の背景

近年の技術革新により、数千チャンネルの大規模超音波振動子アレイが登場するなど超音波診断画像の精度が向上するとともに、生体組織の機能計測法も続々と付加されるなど性能向上が著しい。一方、救急や遠隔医療、ひいては聴診器代替りの使用を目指した小型・携帯用の超音波診断装置の開発も求められており、近年は携帯用機種の開発も進んでいる。更なる小型化・低消費電力化を図るためには、超音波を送受信するための超音波プローブの振動子アレイの振動子数を減少させる必要があるが、振動子数を減少させると超音波診断画像の画質が劣化する。また、現在の携帯型診断装置は、周波数の異なる複数の振動子アレイを切り替えて使用するが、1つの振動子アレイで体内全ての深さをカバーするために、減衰が小さく深達度の高い低周波超音波を用いる方針を採用している。しかし、低周波超音波を用いた場合は、表在組織の観察に不向きである。一方、複数の振動子アレイを用いる場合は小型化に限界がある。

2. 研究の目的

本研究では、1つの振動子アレイで体深部組織と表在組織の両方を観察可能とする2周波数共振超音波振動子を開発することを目的とする。本振動子を用いることで、2つの異なる周波数(低周波数と高周波数)における超音波送受信が可能となる。また、通常の超音波診断装置で使用されている振動子アレイの振動子数は64以上であるが、本研究における2周波数共振超音波振動子の開発では小規模アレイでのイメージングを目指し、そのための素子寸法などに関する検討を行った。また、粗なアレイを用いる場合、従来のビームフォーミング手法では画質が大幅に劣化すると想定されるため、粗なアレイを用いても高い画質を実現する送受信ビームフォーミング法などに関する検討も合わせて行う。開発する2周波数共振超音波プローブと送受信システムを用いて、超音波イメージングを行い、空間分解能などの性能評価を行うことにより、超音波振動子の交換を要しない異なる周波数の超音波によるイメージングの可能性を示す。

3. 研究の方法

3.1. 積層型振動子

本研究では、同じ厚さの圧電振動子を2枚積層した振動子について検討を行った。1層の厚みは、共振周波数が3.6 MHzになるように設計されており、2層では共振周波数1.8 MHz相当の厚みとなる。積層する際、分極方向が同じ場合は奇数次のモードしか発生せず、1次モードに比べ3次モードの効率が極端に低下すると考えられるため、分極方向が逆となる分極反転構造で積層した。

図1に示すように、積層型振動子1個につき3つの電極を設けた。電極2をグランドとし、高周波モードで駆動する場合は、電極1

と2の間もしくは電極2と電極3の間に交流電圧を印加する。低周波モードで駆動する場合は、電極1と電極3に同相の交流電圧を印加する。本研究では、図1の構造の振動子を48個並べた配列型超音波探触子を構築した。素子ピッチは0.2 mmである。

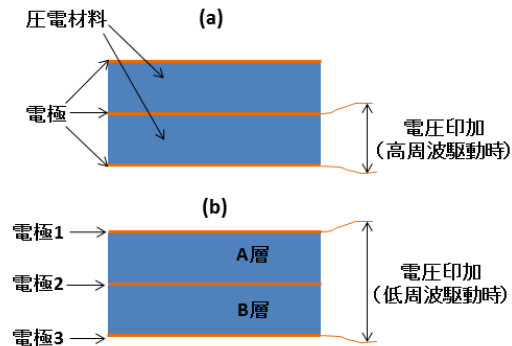


図1: 積層型振動子の構造。高周波モード(a)および低周波モード(b)で駆動する場合の配線。

3.2. 実験システム

本研究では、多チャンネル超音波送受信システムを用いて計測を行った。電極1および電極3それぞれに送受信チャンネルを接続することにより、全電極への電圧印加および信号受信が可能となる。電極2はグランドに接続した。

高周波モードで駆動する場合は、電極3に矩形パルスを印加した。また、低周波モードで駆動する場合は、電極1と電極3に同相の矩形パルスを印加した。いずれのモードの場合も、電極1および3の信号を独立に計測することが可能である。

本研究では、送信に球面拡散波を用いる高速超音波イメージング法に基づき、開発した積層型振動子を用いた超音波信号の計測を行った。球面拡散波の仮想点音源は送信面背面50 mmの距離に設置した。受信信号に、遅延和ビームフォーミングに基づく並列ビーム形成処理を適用することにより超音波断層像を構築した。本研究では、1回の送信により1枚の断層像を構築した。

4. 研究成果

超音波画像評価用ファントム(model 040GSE, CIRS)を対象に計測を行った。電極1および電極3で計測された受信信号を図2(a)に示す。図2(a)において、青線は電極1で計測された信号、緑線は電極3で計測された信号を示す。また、電極1および3の信号間の差および和を取った信号を図2(b)に示す。青線は差を、緑線は和を示す。

計測された信号の周波数特性を調べるため、図2に示される信号のパワースペクトルを算出した結果を図3に示す。図3(a)は電極1(青線)および電極3(緑線)からの信号、図3(b)はそれらの差(青線)および和(緑線)のパワースペクトルをそれぞれ示す。

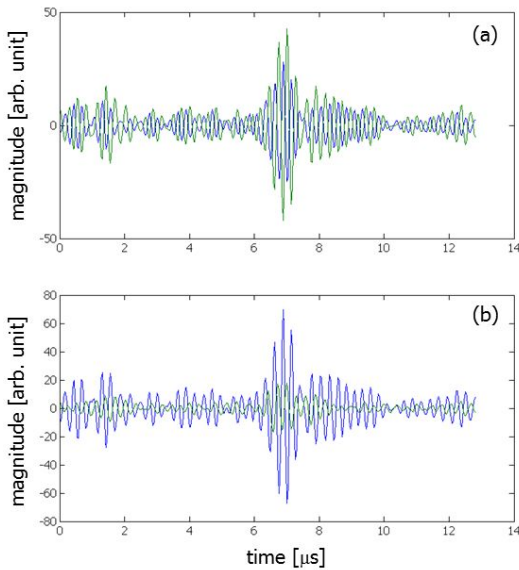


図 2: 高周波モードで駆動した場合に受信された信号。(a) 青線: 電極 1. 緑線: 電極 3. (b) 青線: 電極 1 と電極 3 の差分. 緑線: 電極 1 と電極 3 の和.

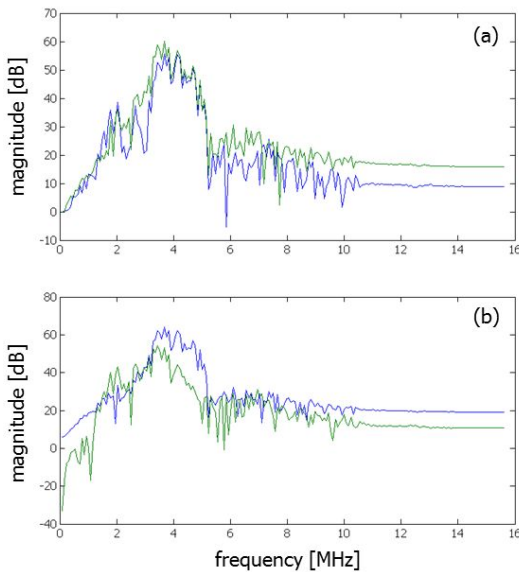


図 3: 高周波モードで駆動した場合に受信された信号のパワースペクトル。(a) 青線: 電極 1. 緑線: 電極 3. (b) 青線: 電極 1 と電極 3 の差分. 緑線: 電極 1 と電極 3 の和.

図 3 では高周波モードで駆動しているため、3.6 MHz 付近を中心に帯域を形成している。また、図 3(b)より、電極 1 と電極 3 の信号の差をとることにより高周波成分が強調され、和をとることにより低周波成分が強調されるため、電極 1 と 3 の信号には、高周波成分が逆相で、低周波成分が同相で含まれていることが分かる。

同様に、積層型振動子を低周波モードで駆動した場合に、電極 1 (青線) および電極 3 (緑線) で測定された信号を図 4(a)に示す。それに対応するパワースペクトルが図 5(a)であ

るが、この場合は低周波モードでの駆動のため、1.8 MHz 付近にもピークが出現していることが分かる。

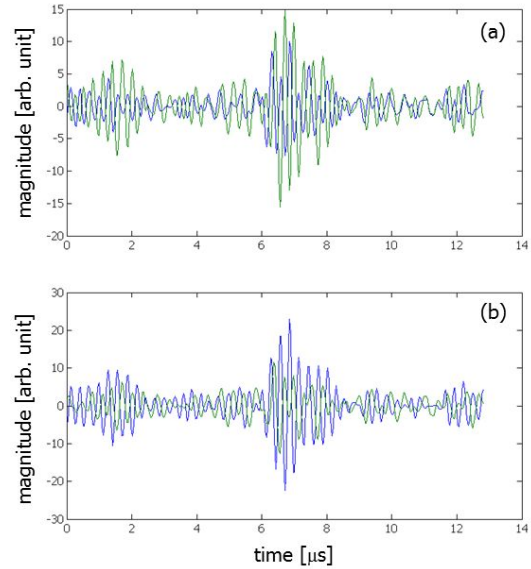


図 4: 低周波モードで駆動した場合に受信された信号。(a) 青線: 電極 1. 緑線: 電極 3. (b) 青線: 電極 1 と電極 3 の差分. 緑線: 電極 1 と電極 3 の和.

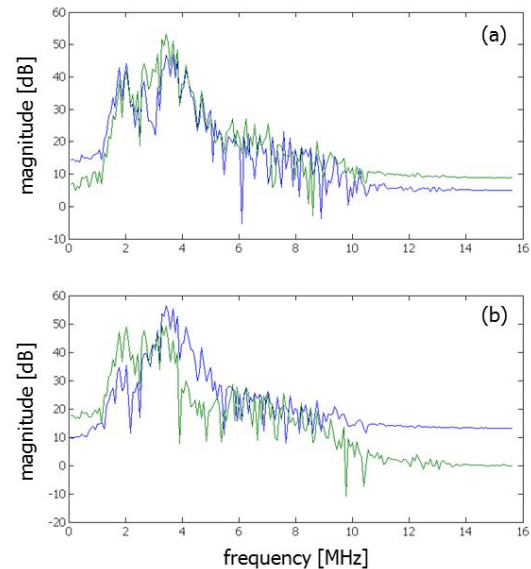


図 5: 低周波モードで駆動した場合に受信された信号のパワースペクトル。(a) 青線: 電極 1. 緑線: 電極 3. (b) 青線: 電極 1 と電極 3 の差分. 緑線: 電極 1 と電極 3 の和.

高周波モード駆動の場合と同様に、電極 1 および電極 3 からの信号の差(青線)と和(緑線)をとった信号を図 4(b)に示す。それらについてもパワースペクトルを算出した結果を図 5(b)に示す(青線: 差, 緑線: 和)。高周波モード駆動の場合と同様に、差をとることにより高周波側が、和をとることにより低周波側が強調される結果となっている。しかし、図 5(b)と図 3(b)を比較すると、高周波モー

ド駆動時の 3.6 MHz 付近を中心とする周波数成分に比べ、低周波モード駆動時の 1.8 MHz 付近を中心とする成分は 10 dB 程度低くなっている。これは、厚さの等しい分極反転層を用いた構造では、奇数次モードが消失することが影響していると考えられる。送信時には、2 層でひずみが同方向になるよう振動子を駆動しているため、送信波には 1 次モード、つまり 1.8 MHz を中心とする成分が含まれていると考えられるが、受信時に素子の 1 次モード共振が低効率となっている可能性がある。

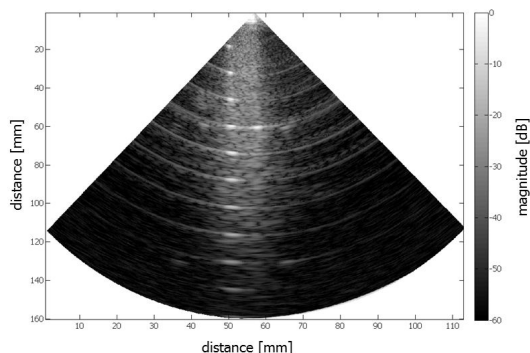


図 6: 高周波モードで駆動し、電極 1 の受信信号と電極 3 の受信信号の差から構築した超音波 B モード断層像。

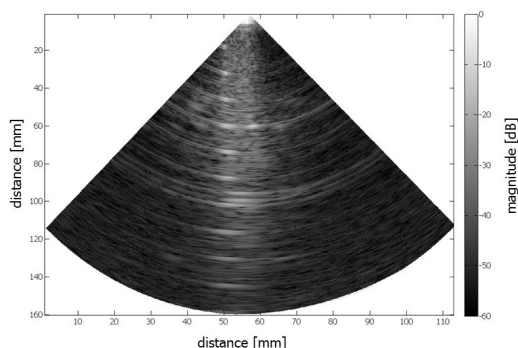


図 7: 低周波モードで駆動し、電極 1 の受信信号と電極 3 の受信信号の和から構築した超音波 B モード断層像。

本報告では、異なる周波数成分によるイメージングの例として、高周波モードで駆動した場合に電極 1 と電極 3 で受信された信号の差から構築した超音波 B (Brightness) モード断層像、および低周波モードで駆動した場合に電極 1 と電極 3 で受信された信号の和から構築した超音波 B モード断層像をそれぞれ図 6 と図 7 に示す。使用したファントムは背景としてランダムに超音波散乱体が分布していると考えられる媒質を含むため、図 6 および図 7 における背景の輝度が高い領域から、球面拡散送信波が照射された範囲が認識できる。

いずれの断層像においても、背景媒質中に複数配置されたワイヤターゲットからのエコーを確認できるが、図 6 の断層像に比べ、図 7 の断層像では、ワイヤターゲットからの

エコーが距離方向および方位方向にも拡がりが大きく、図 6 の方が高周波成分により高分解能に断層像が構築されていることを示す結果であると言える。一方、低周波モードで得られた断層像の下部における輝度(エコー信号強度)は、高周波モードで得られたものに比べて高く、低周波モードの方が深い領域のイメージングに適していると考えられる。

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 24 件)

- 1) R. Kaneko, S. Sawada, A. Tokita, R. Honkura, N. Tamura, S. Kodama, T. Izumi, K. Takahashi, K. Uno, J. Imai, T. Yamada, Y. Miyachi, H. Hasegawa, H. Kanai, Y. Ishigaki, and H. Katagiri, "Serum cystatin C level is associated with carotid arterial wall elasticity in subjects with type 2 diabetes mellitus: A potential marker of early-stage atherosclerosis," *Diabetes Research and Clinical Practice*, vol. 139, pp. 43-51, 2018.
- 2) M. Mozumi and H. Hasegawa, "Adaptive beamformer combined with phase coherence weighting applied to ultrafast ultrasound," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 204, 2018.
- 3) H. Fujita and H. Hasegawa, "Effect of frequency characteristic of excitation pulse on lateral spatial resolution in coded ultrasound imaging," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 56, no. 7S1, pp. 07JF16, 2017.
- 4) H. Hasegawa, "Improvement of range spatial resolution of medical ultrasound imaging by element-domain signal processing," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 56, no. 7S1, pp. 07JF02, 2017.
- 5) H. Hasegawa, "Apodized adaptive beamformer," *Journal of Medical Ultrasonics*, vol. 44, no. 2, pp. 155-165, 2017.
- 6) M. Tanaka, T. Sakamoto, S. Sugawara, Y. Katahira, K. Hasegawa, H. Nakajima, T. Kurokawa, H. Kanai, and H. 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, 2017.
- 7) H. Hasegawa, "Improvement of penetration of modified amplitude and phase estimation beamformer," *Journal of Medical Ultrasonics*, vol. 44, no. 1, pp. 3-11, 2017.
- 8) Y. Shinoda, H. Tagashira, S. Bhuiyan, H. Hasegawa, H. Kanai, C. Zhang, F. Han, and K. Fukunaga, "Corticosteroids mediate heart failure-induced depression through reduced $\sigma 1$ -receptor expression," *PLoS ONE*, vol. 11, no. 10, pp. 1-19, 2016.
- 9) R. Hendradi, A. Arifin, H. Shida, S. Gunawan, M. H. Purnomo, H. Hasegawa, and H. 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, 2016.
- 10) Y. Shinoda, H. Tagashira, M. S. Bhuiyan, H. Hasegawa, H. Kanai, and K. Fukunaga, “Haloperidol aggravates transverse aortic constriction-induced heart failure via mitochondrial dysfunction,” *Journal of Pharmacological Sciences*, vol. 131, no. 3, pp. 172-183, 2016.
 - 11) H. Hasegawa and C. L. de Korte, “Impact of element pitch on synthetic aperture ultrasound imaging,” *Journal of Medical Ultrasonics*, vol. 43, no. 3, pp. 317-325, 2016.
 - 12) H. Hasegawa, M. Sato, and T. Irie, “High resolution wavenumber analysis for investigation of arterial pulse wave propagation,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 7S1, pp. 07KF01, 2016.
 - 13) H. Hasegawa, “Phase-sensitive 2D motion estimators using frequency spectra of ultrasonic echoes,” *Applied Sciences*, vol. 6, no. 7, pp. 195, 30, 2016.
 - 14) 宮下 進, 室月 淳, 室本 仁, 小澤克典, 長谷川英之, 金井 浩, “位相差トラッキング法,” *超音波医学*, vol. 43, no. 3, pp. 483-490, 2016.
 - 15) 長谷川英之, “ドブラ法の原理と応用,” *超音波医学*, vol. 43, no. 3, pp. 411-415, 2016.
 - 16) T. Shindo, K. Ito, T. Ogata, K. Hatanaka, R. Kurosawa, K. Eguchi, Y. Kagaya, K. Hanawa, K. Aizawa, T. Shiroto, S. Kasukabe, S. Miyata, H. Taki, H. Hasegawa, H. Kanai, and H. Shimokawa, “Low-intensity pulsed ultrasound enhances angiogenesis and ameliorates left ventricular dysfunction in a mouse model of acute myocardial infarction,” *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, vol. 36, no. 6, pp. 1220-1229, 2016.
 - 17) 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, 2016.
 - 18) H. 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, 2016.
 - 19) K. Ozawa, J. Muromoto, S. Miyashita, J. Muromoto, H. Hasegawa, H. Kanai, and N. 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, 2015.
 - 20) H. Takahashi, H. Hasegawa, and H. 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, 2015.
 - 21) H. Takahashi, H. Hasegawa, and H. 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, 2015.
 - 22) T. Oguri, K. Tamura, K. Yoshida, J. Mamou, H. Hasegawa, H. Maruyama, H. Hachiya, and T. 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, 2015.
 - 23) Y. Miyachi, H. Hasegawa, and H. 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, 2015.
 - 24) S. Miyashita, J. Muromoto, J. Muromoto, K. Ozawa, N. Yaegashi, H. Hasegawa, and H. 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, 2015.
- [学会発表](計74件)
- 1) H. Hasegawa and M. Mozumi, “Adaptive beamformer with phase coherence factor weighting applied to ultrafast ultrasound,” 2017 International Congress on Ultrasonics, Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, USA, December 18-20, 2017 (招待講演).
 - 2) H. Hasegawa, “Methods for ultrafast imaging and motion estimation for cardiac functional imaging,” Workshop on Theranostic Ultrasound in Cardiology and Neurology, University of Hong Kong, Hong Kong, China, December 5, 2017 (招待講演).
 - 3) H. Hasegawa, K. Kaburaki, and M. Mozumi, “Cardiac blood flow imaging by ultrafast ultrasound based on beamforming in Cartesian coordinate,” International Conference on Biomedical Ultrasound, Hong Kong Polytechnique University, Hong Kong, China, December 3-4, 2017.
 - 4) H. Hasegawa, “Adaptive beamforming applied to transverse oscillation,” 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium, Omni Shoreham Hotel, Washington, D.C., USA, September 5-9, 2017.
 - 5) H. Hasegawa and M. Mozumi, “Maximum likelihood estimation of scattering strength for high range resolution ultrasound imaging,” 2017 IEEE International Ultrasonics

- Symposium, Omni Shoreham Hotel, Washington, D.C., USA, September 5-9, 2017.
- 6) K. Kaburaki, H. Hasegawa, and T. Yamaguchi, "Estimation of myocardial strain rate using high-frame-rate echocardiography," International Forum on Medical Imaging in Asia (IFMIA) 2017, Tenbusu Naha, Naha, Okinawa, Japan, January 19-20, 2017.
 - 7) H. Hasegawa, "Signal processing techniques in medical ultrasound imaging," 2016 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing, Guang Dong Hotel, Shanghai, China, December 23-25, 2016 (基調講演).
 - 8) H. Hasegawa, "High temporal and spatial resolution ultrasonic imaging and application to cardiovascular imaging," The 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, Hilton Hawaiian Village Waikiki Beach Resort, Honolulu, Hawaii, USA, November 28-December 2, 2016 (招待講演).
 - 9) H. Hasegawa and H. Kanai, "Adaptive beamformer incorporating with element directivity," 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, October 21-24, 2015.
 - 10) H. Takahashi and H. Hasegawa, "Two dimensional blood velocity estimation using high frame rate echocardiography with transverse oscillation approach," 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, October 21-24, 2015.
 - 11) H. Hasegawa, "Adaptive beamforming," Artimino Conference on Medical Ultrasound 2015, Örenäs Slott, Sweden, June 7-10, 2015.
 - 12) H. Hasegawa, "Ultrasonic high frame-rate cardiovascular imaging," International Symposium on Ultrasound Imaging and Therapy, Lund University, Sweden, June 5, 2015 (招待講演).
 - 13) 布目宗一郎, 長谷川英之, "周波数補償付多周波位相追跡法の3次元化に関する検討," 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 日本工業大学, 埼玉, March 13-15, 2018.
 - 14) 長谷川英之, "固有値展開・特異値分解を用いた遅延和ビームフォーミング," 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 日本工業大学, 埼玉, March 13-15, 2018.
 - 15) 茂澄倫也, 長谷川英之, "適応ビームフォーマと位相コヒーレンス因子の併用による空間分解能の向上," 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 日本工業大学, 埼玉, March 13-15, 2018.
 - 16) 佐藤雅弘, 長谷川英之, "数値シミュレーションによる生体内を伝搬するずれ弾性波解析," 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 日本工業大学, 埼玉, March 13-15, 2018.
 - 17) 笹倉優太, 長谷川英之, 佐藤雅弘, 八木晋一, "FDTD 法を用いたせん断波伝播シミュレーション," 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 日本工業大学, 埼玉, March 13-15, 2018.
 - 18) 岩森光司, 荒川元孝, 長谷川英之, 金井浩, "血管の長軸方向変位を考慮した動脈壁の局所弾性率の超音波計測法の基礎検討," 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 日本工業大学, 埼玉, March 13-15, 2018.
 - 19) 長谷川英之, 西條芳文, 梅村晋一郎, "分極反転構造を有する積層型振動子による超音波イメージング," 圧電材料・デバイスシンポジウム 2018, 東北大学青葉山キャンパスカタールホール, 仙台, February 5-6, 2018.
 - 20) 長谷川英之, "超音波による流れ・組織動態の計測法," 日本超音波医学会第 29 回関東甲信越地方会学術集会, JP タワー, 東京, November 11-12, 2017 (招待講演).
 - 21) M. Mozumi and H. Hasegawa, "Estimation of transmit-receive response of ultrasound system for high range resolution imaging," The 38th Symposium on Ultrasonic Electronics, Tagajo City Cultural Center, Tagajo, Miyagi, October 25-27, 2017.
 - 22) A. Miyajo and H. Hasegawa, "Analysis of 2D motion velocity of common carotid arterial wall by estimation of phase shift and frequency of received ultrasonic echo," The 38th Symposium on Ultrasonic Electronics, Tagajo City Cultural Center, Tagajo, Miyagi, October 25-27, 2017.
 - 23) K. Kaburaki, M. Mozumi, and H. Hasegawa, "2D motion velocity estimation using beamformed ultrasonic signal in Cartesian coordinate for measurement of cardiac dynamics," The 38th Symposium on Ultrasonic Electronics, Tagajo City Cultural Center, Tagajo, Miyagi, October 25-27, 2017.
 - 24) H. Hasegawa, "Investigation on maximum likelihood method for measurement of regional pulse wave velocity," The 38th Symposium on Ultrasonic Electronics, Tagajo City Cultural Center, Tagajo, Miyagi, October 25-27, 2017.
- (他 50 件)
〔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