

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月 7日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23650299

研究課題名（和文） 脳血管診断のための頸動脈血流・脈波伝播特性の高精度解析

研究課題名（英文） Analysis of blood flow and pulse wave propagation in carotid artery for diagnosis of cerebrovascular system

研究代表者

長谷川 英之 (HASEGAWA HIDEYUKI)

東北大学・大学院医工学研究科・准教授

研究者番号：00344698

研究成果の概要（和文）：本研究では、超音波断層像の撮像速度を従来の数十 Hz から数千 Hz まで向上させた独自の超高速イメージング法を用いて、局所の脈波伝播速度および脳血管系の弾性特性を反映していると考えられる脈波の反射特性に関する解析を行った。局所脈波伝播速度を計測・推定する手法を開発し、推定された脈波伝播速度の極性から入射波と反射波を同定することに成功した。また、血行動態解析については、血球からの超音波エコーを可視化してその動きを高時間分解能で観察することを可能とした。さらに、可視化した血球エコーの空間周波数解析により流線を描出する手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：In the present study, the regional pulse wave propagation and reflection of pulse wave from the cerebrovascular system were analyzed using a custom system which realizes ultrasonic imaging at a frame rate of a few thousands Hz. We have developed a method for measurement of regional propagation velocities of forward and reflected waves individually in the carotid artery, the forward and reflected waves were identified successfully. Furthermore, for detailed analysis of blood flow dynamics, ultrasonic echoes from blood particles were visualized successfully, and the stream lines were also visualized by spatial frequency analysis of ultrasonic echoes from blood particles.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：脈波，血流，流線，血管動態，超音波

## 1. 研究開始当初の背景

重篤な循環器系疾患の発症を抑制するためには、それら疾患を発症する以前に、日頃から血管状態を把握しておくことが重要である。超音波診断は MRI や CT に比べ非侵襲かつ簡便なため、反復診断の手段として大変有用である。血管壁の状態、特に弾性的特性(硬さ)を測定するための方法として、脈波伝播速度法があるが、脈波速度は数 m/s と速く、超音波断層像の範囲数 cm を数 ms で通過してしまうため、局所の脈波速度は測定できず、心臓から手首もしくは足首までの非常

に長い伝搬経路の平均的な弾性特性を評価しているのが現状である。これを解決するため、上腕の血圧と動脈壁の径変化を超音波計測して動脈壁の弾性特性を評価し、その計測点での脈波速度を推定する方法が開発された。この手法は、脈波速度が血管壁の弾性特性に依存することを利用して脈波速度を推定しているが、実際には脈波速度は血管の寸法・形状にも依存するという問題がある。したがって、頸動脈を伝播する脈波を超高速イメージングで直接可視化し、局所伝播速度を計測する必要がある。

また、血流計測については現在のところ超音波ドプラ法が主流であるが、超音波ビーム方向の血流速度計測しか計測できないため、複雑な流れの計測には不向きである。これを解決する手法として、B-flow という、血球からの超音波エコーを直接可視化する手法が開発された。この手法では、血球の動きを定性的に観察することが可能であるが、この手法を用いて数十 Hz のフレームレートで観察している動きは実際の血流速度には対応しない(頸動脈血流速度は 1 m/s 以上と早いため、数十 Hz のフレームレートでは動きを追えない)という問題がある。これを解決するためには、血球からの超音波エコー信号をより高い時間分解能で可視化することが必要である。

## 2. 研究の目的

本申請者はこれまでに、超音波イメージングの速度を従来の数十 Hz から数千 Hz へ飛躍的に向上させる独自の手法を開発し、この手法に基づき脈波到来にともなう動脈壁の振動や血球からの超音波エコーをこれまでになく詳細に描出できることが分かった。

また、超高速イメージング法により頸動脈長軸方向複数点における壁の振動速度を計測することにより、計測された速度波形において、末梢へ向かう進行波と、心臓に向かう反射波が存在することが明瞭に認識することができる。本研究では、超高速イメージングにより初めて得られる動脈壁上複数点の振動速度から、進行波と反射波を分離してそれらの伝播速度を推定する手法を開発する。また、反射波の大きさは脳血管系の弾性特性に依存(弾性率が上昇することにより反射波振幅が増大)すると考えられることから、進行波と反射波を分離して反射波の振幅を推定することで、脳血管系に関する情報が得られることも期待できる。

また、血流動態計測については、血球からの超音波エコーを超高速で描出してその動きを可視化する他、時間方向に加算平均することで、天体の長時間露光撮影のように血球からのエコーの軌跡を描出して流線を可視化する全く新しい血流計測方法を開発する。

## 3. 研究の方法

### (I) 高速超音波イメージング法

従来のリニア走査では送信・受信ともにビームを形成するため、超音波送信繰り返し周波数を  $f_{\text{PRF}}$ 、ビーム本数を  $N_{\text{bm}}$  とするとフレームレートは  $f_{\text{PRF}}/N_{\text{bm}}$  となる。

一方、parallel beam forming (PBF) では、広いビームを送信(本研究では平面波)し、そのビーム内に複数の受信ビームを形成するため、リニア走査と同じビーム本数を得るために必要な送信回数を減少させることができ

る。ただし、最終的なビームの指向性は、送信ビームと受信ビームの指向性の積となるため、従来のリニア走査に比べ方位分解能は劣化する。

本研究では、 $N_t = 96$  チャンネル同時送受信を行うことにより parallel beam forming を行った。1つの受信ビームを形成するために使用する素子の数を  $N_e$  とし、第  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) 回目の送受信に使用する素子の番号を  $(N_t - N_e)(m - 1) + i$  ( $i = 1, 2, \dots, N_e$ ) とすると、一回の送受信で  $(N_t - N_e)$  本のビームを形成することができる。本報告では、送信回数  $M = 3$ 、受信ビーム形成に使用する素子数  $N_e = 72$  とすることにより、 $M(N_t - N_e) = 72$  本のビームを形成した。 $f_{\text{PRF}} = 10416$  Hz (観察可能深度: 7.4 cm) であるから、以上の処理によりフレームレート  $f_{\text{PRF}}/M =$  約 3500 Hz を実現できる。

### (II) 動脈壁の微小振動速度の計測法

本研究では、頸動脈壁の微小振動速度を位相差トラッキング法を用いて動脈長軸方向 72 点(間隔 0.2 mm)で計測する。フレームレートは  $\Delta T = 3472$  Hz である。ある時刻  $t$  における動脈壁のフレーム間のビーム方向変位  $\Delta z(t)$  により生じる超音波の伝播時間の変化  $\Delta \tau(t)$  は  $2\Delta z(t)/c_0$  ( $c_0$ : 音速)であることから、時刻  $t$  と  $(t + \Delta T)$  において受信された超音波信号間の位相差  $\Delta \theta(t)$  は次式で表される。

$$\Delta \theta(t) = -\frac{2\omega_0 \Delta z(t)}{c_0} \quad (1)$$

ここで、 $\omega_0$  は超音波の中心角周波数である。(1)式をもとに推定されたフレーム間変位  $\Delta z(t)$  をフレーム間隔  $\Delta T$  で除することにより、フレーム間の平均速度  $v(t)$  が次式により得られる。

$$v\left(t + \frac{\Delta T}{2}\right) = -\frac{c_0}{2\Delta T} \frac{\Delta \theta(t)}{\omega_0} \quad (2)$$

### (III) 複素相関関数を用いた脈波速度推定

本研究では、位相差トラッキング法により推定した動脈壁の微小振動速度  $v(t)$  を時間微分して得られる加速度波形  $a(t)$  を用いることにより微小振動の高周波成分を増幅し、脈波速度解析における時間分解能を向上させる。各超音波ビーム位置  $m$  ( $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ ;  $M$ : ビーム位置数)において得られた加速度波形  $a_m(t)$  にはヒルベルト変換を適用して解析信号  $g_m(t)$  として解析を行った。

時刻  $t_0$  における解析信号間の複素相互相関関数  $\gamma(t_0, \tau_i)$  ( $\tau_i = i \cdot \Delta T$ : 相関関数のラグ)は次式により得られる。

$$\gamma(t_0, \tau_i) = \sum_{m=0}^{M/2} \sum_{k=-N_e}^{N_e} g_m^*(t_0 + k\Delta T) \cdot g_{m+M/2}(t_0 + k\Delta T + \tau_i) \quad (3)$$

ここで、 $(2N_c + 1)$ と相関窓幅である。

頸動脈長軸方向距離 $\delta x \cdot M/2$  ( $\delta x$ : ビーム間隔 0.2 mm)間の脈波伝播における $g_m(t_0)$ に対する $g_{m+M/2}(t_0)$ の遅延時間を $\delta\tau$ とし、解析信号 $\{g_m(t_0)\}$ の卓越周波数を $f_a$ とすると、 $\delta\tau$ は次式で表すことができる。

$$\delta\tau = -\frac{\angle\gamma(t_0, 0)}{2\pi f_a} \quad (4)$$

ラグ $\tau_i$ を変化させた場合は次式のようにモデル化できる。

$$\begin{aligned} \angle\hat{\gamma}(t_0, \tau_i) &= 2\pi f_a(\tau_i - \delta\tau) \\ &= 2\pi f_a(i \cdot \Delta T) - 2\pi f_a \delta\tau \\ &\equiv p \cdot i + q \end{aligned} \quad (5)$$

卓越周波数 $f_a$ と遅延時間 $\delta\tau$ を推定するため、定数 $p$ と $q$ を最小二乗法により決定する。測定値 $\angle\gamma(t_0, \tau_i)$ とそのモデル $\angle\hat{\gamma}(t_0, \tau_i)$ の間の二乗平均誤差 $\alpha(t_0)$ は次式で定義される。

$$\alpha(t_0) = \sum_{i=-N_i}^{N_i} |\angle\gamma(t_0, \tau_i) - (p \cdot i + q)|^2 \quad (6)$$

(6)式の $\alpha(t_0)$ を最小とする $\hat{p}$ と $\hat{q}$ を決定することにより、卓越周波数 $f_a$ と頸動脈長軸方向距離 $\delta x \cdot M/2$ 間の脈波伝播速度 $c_{PWV}(t_0)$ は次のように推定できる。

$$\hat{f}_a = \frac{\hat{p}}{2\pi\Delta T} \quad (7)$$

$$c_{PWV}(t_0) = \frac{M \cdot \delta x}{2 \delta\tau} = -\frac{\hat{p} \cdot M \cdot \delta x}{\hat{q}} \quad (8)$$

#### (IV) 血流イメージング法

超音波ビーム方向と血流方向が直交している場合、動きの速い血球からの超音波エコーと動きの遅い軟組織からの超音波エコーの分離が困難になるため、受信ビームは $\phi = -\varphi_0, 0, \varphi_0$ の3種類の偏向角度で形成し( $\varphi_0 > 0$ )、 $\phi = -\varphi_0, \varphi_0$ のビームを血流の描出に使用した。

血流イメージングでは、偏向角度 $-\varphi_0$ と $\varphi_0$ のビームから得られる超音波 RF 信号に高域通過処理を行い、血球からのエコーを強調する。2つの偏向角度 $-\varphi_0, \varphi_0$ において得られる、第 $n$ フレームの点 $(x, y)$ における血球からのエコー信号(高域通過処理後)の振幅を $G_{-\varphi_0}(x, z; n)$ ,  $G_{\varphi_0}(x, z; n)$ とすると( $G$ はそれぞれ正規化されている)、血流描出に用いられるエコー信号の振幅データ $G_0(x, z; n)$ は次式で表される。

$$G_0(x, z; n) = \begin{cases} G_{-\varphi_0}(x, z; n) \text{ or } G_{\varphi_0}(x, z; n) \\ \text{(beams do not overlap)} \\ \frac{G_{-\varphi_0}(x, z; n) + G_{\varphi_0}(x, z; n)}{2} \\ \text{(beams overlap)} \end{cases} \quad (9)$$

$\phi = 90$ 度で形成されたビームから得られる

エコー信号の振幅(高域通過処理なし)を $G_p(x, z; n)$ とすると、血球からのエコーと動脈壁などの組織からのエコー両方の振幅を(2)式により重み付け平均したものを $G(x, z; n)$ を最終的な超音波像として表示する。

$$G(x, z; n) = \alpha G_p(x, z; n) + (1 - \alpha) G_0(x, z; n) \quad (10)$$

$(0 \leq \alpha \leq 1)$

本研究では、 $\alpha$ は 0.9 と設定した。

以上の処理において、血球からの超音波エコーの S/N を改善するために、フレーム方向の加算平均を行うが、その際に加算平均幅を短くすればスペckルパターンの動きにより血流動態を観察することが可能であり、加算平均幅を長くすれば、各超音波エコーが通過した軌跡を描出することができる。さらに、加算平均した場合に超音波エコー信号を空間周波数解析することにより軌跡に対応する特徴的な周波数成分を抽出することにより血球からの超音波エコーの軌跡(= 流線)を強調して表示することができる。

#### 4. 研究成果

図 1(a), 1(b), 1(c)はそれぞれ、被験者 A (24 歳), B (23 歳), C (38 歳)の頸動脈の超音波 B モード断層像である。72 ビーム位置において得られた超音波エコー信号を位相差トラッキング法により解析し、振動速度波形、加速度波形等を算出した。被験者 A の頸動脈壁について計測した変位波形、速度波形、加速度波形を図 2 に示す。

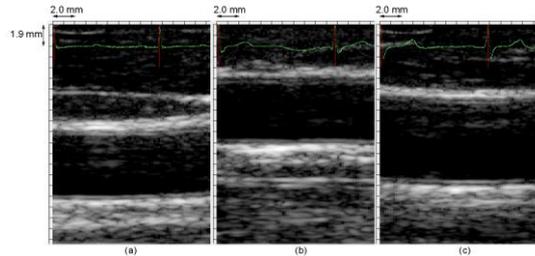


図 1: 計測したヒト頸動脈の超音波 B モード断層像。(a) 被験者 A (24 歳男性). (b) 被験者 B (23 歳男性). (c) 被験者 C (38 歳男性).

3 節で述べた手法により局所脈波伝播速度を推定したところ、被験者については反射波が検出された。図 2 に示すように、反射波を特定することで、その振幅も確認ことができ、反射波の振幅の大きさと脳血管系の硬化度を評価できる可能性がある。進行波と反射波の伝播速度を推定したところ、それぞれ 5.6 m/s と 8.4 m/s であった。それぞれの伝播速度が推定された時刻は図 2 の破線で示してある。頸動脈の同じ領域でありながら進行波と反射波の伝播速度が異なるのは、血圧の違いによるものと考えられる。血管壁の変位波

形はほぼ血圧波形に対応するため、変位波形を参考に考えると、進行波が存在する時刻はほぼ拡張期血圧に対応し、反射波が存在する時刻はほぼ収縮期血圧に対応する。血管壁は血圧の上昇により見かけ上硬化するため、それにより脈波伝播速度が上昇したと考えられる。本手法により高時間分解能で局所脈波伝播速度を計測することで、脈波伝播速度の血圧依存性を計測することができれば、従来問題となってきた脈波伝播速度の血圧依存性を補正できる可能性がある。これは本研究で副産物的に得られた有用な知見である。

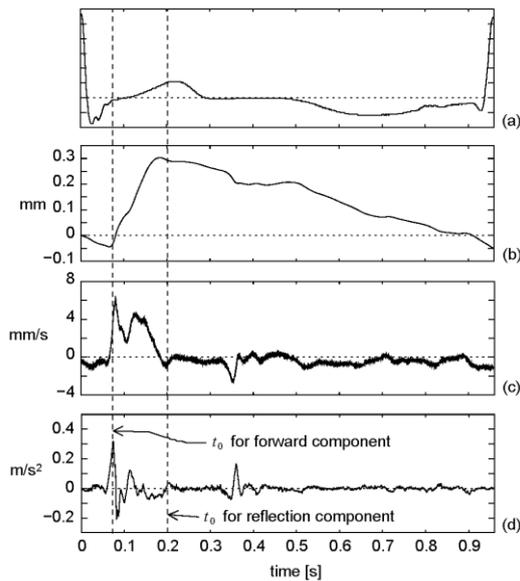


図 2: 被験者 A について *in vivo* 計測された (a) 心電図波形, 頸動脈壁の (b) 変位波形, (c) 速度波形, (d) 加速度波形。

また、ヒト頸動脈において血流の高時間分解能イメージングを行った結果を図 3 に示す。本研究では、短いフレーム方向平均幅でも血球からの超音波エコーを描出することを可能とするため、超音波送信波のコード化に関する最適化を行った。その結果、図 3(a) に示すようにフレーム方向平均幅 4.6 ms 程度でも血球からの超音波エコーを描出することが可能となり、スペックルパターンの動きから血流動態を観察することが可能となった。さらに、フレーム方向の平均幅を広くして 18.4 ms とすることにより、図 3(b) に示す血球からの超音波エコーの移動軌跡が観察でき、図 3(b) における血球からの超音波エコー信号を空間周波数解析することにより、図 3(c) に示す流線を描出することができた。

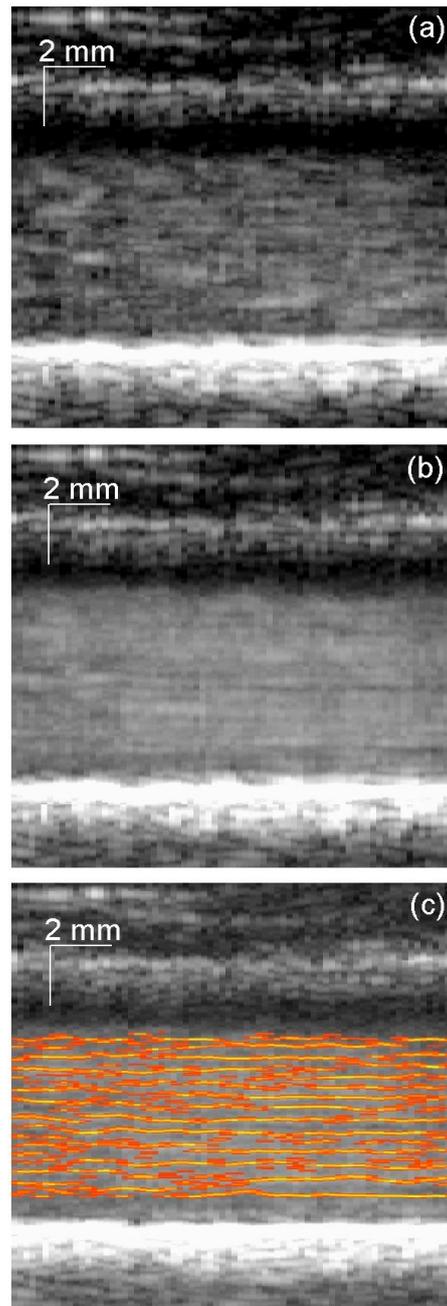


図 3: ヒト頸動脈血流の高時間分解能イメージング結果. (a) フレーム方向平均幅 4.6 ms の場合の血球エコー描出結果. (b) フレーム方向平均幅 18.4 ms の場合の血球エコー描出結果. (c) (b) において得られた血球エコーの空間周波数解析により描出した流線。

#### 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 15 件)

1) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "High Frame Rate Echocardiography With Reduced Sidelobe Level," IEEE

Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (査読有), vol. 59, pp. 2569-2575, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2490>

2) Jun Yamaguchi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Measurement of Displacement and Strain in Biological Tissue Generated by Ultrasound Dual Acoustic Radiation Force," Journal of Medical Ultrasonics (査読有), vol. 39, pp. 279-281, 2012.

DOI: 10.1007/s10396-012-0372-9

3) Yasunori Honjo, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Optimization of Correlation Kernel Size for Accurate Estimation of Myocardial Contraction and Relaxation," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 51, pp. 07GF06-1-07GF06-12, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.07GF06>

4) Kazuki Ikeshita, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Improvement in Accuracy of Ultrasonic Measurement of Transient Change in Viscoelasticity of Radial Arterial Wall Due to Flow-Mediated Dilation by Adaptive Low-Pass Filtering," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 51, pp. 07GF14-1-07GF14-7, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.07GF14>

5) Nabilah Ibrahim, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Detection of Boundaries of Carotid Arterial Wall by Analyzing Ultrasonic RF Signals," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 51, pp. 07GF07-1-07GF07-8, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.07GF07>

6) Hiro Shida, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Evaluation of Rate of Change in Thickness of Heart Wall by Measuring Time Variation," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 51, pp. 07GF05-1-07GF05-6, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.07GF05>

7) Kosuke Kitamura, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Accurate Estimation of Carotid Luminal Surface Roughness Using Ultrasonic Radio-Frequency Echo," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 51, pp. 07GF05-1-07GF05-10, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.07GF08>

8) Magnus Cinthio, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Initial Phantom Validation of Minute Roughness Measurement Using Phase Tracking for Arterial Wall Diagnosis Non-Invasively In

Vivo," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (査読有)," vol. 58, pp. 853-857, 2011.

DOI: 10.1109/TUFFC.2011.1879

9) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "High-Frame-Rate Echocardiography Using Diverging Transmit Beams and Parallel Receive Beamforming," Journal of Medical Ultrasonics (査読有), vol. 38, pp. 129-140, 2011.

DOI: 10.1007/s10396-011-0304-0

10) Taku Fukushima, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Estimation of Scatterer Diameter by Normalized Power Spectrum of High-Frequency Ultrasonic RF Echo for Assessment of Red Blood Cell Aggregation," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 50, pp. 07HF02-1-07HF02-8, 2011.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.50.07HF02>

11) Akinlolu Ponnle, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Multi Element Diverging Beam from a Linear Array Transducer for Transverse Cross Sectional Imaging of Carotid Artery: Simulations and Phantom Vessel Validation," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 50, pp. 07HF05-1-07HF05-10, 2011.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.50.07HF05>

12) Kazuki Ikeshita, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Noninvasive Measurement of Transient Change in Viscoelasticity Due to Flow-Mediated Dilation Using Automated Detection of Arterial Wall Boundaries," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 50, pp. 07HF08-1-07HF08-7, 2011.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.50.07HF08>

13) Atsuhiko Suzuki, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Estimation of the Elevational Distance between Image Planes by Analysis of Ultrasonic Echoes from Point Scatterers," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 50, pp. 07HF09-1-07HF09-7, 2011.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.50.07HF09>

14) Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Automated Identification of the Heart Wall Throughout the Entire Cardiac Cycle Using Optimal Cardiac Phase for Extracted Features," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 50, pp. 07HF16-1-07HF16-9, 2011.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.50.07HF16>

15) 本庄泰徳, 長谷川英之, 金井 浩, "二次元収縮弛緩特性計測を目指した心筋運動の

高フレームレート計測,” 電子情報通信学会論文誌 A (査読有), vol. J94-A, pp. 826-835, 2011.

〔学会発表〕 (計 11 件)

- 1) Nabilah Ibrahim, 長谷川英之, 金井 浩, “Detection of Arterial Wall Boundaries Using an Echo Model Composed of Multiple Ultrasonic Pulses,” The 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics (November 13-15, 2012, Chiba).
- 2) 影山 奨, 長谷川英之, 金井 浩, “Increasing Bandwidth of Ultrasound RF Echoes Using Wiener Filter for Speckle Suppression,” The 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics (November 13-15, 2012, Chiba).
- 3) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, “Suppression of Sidelobe in High Frame Rate Echocardiography Using Diverging Beams,” Medicinteknikdagarna (October 2-3, 2012, Lind, Sweden).
- 4) Yoshifumi Nagai, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, “Accurate Ultrasonic Measurement of Luminal Surface Roughness of Carotid Artery Using Arterial Longitudinal Motion,” Euromech 534 Colloquium (May 29-31, 2012, Saint Etienne, France).
- 5) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, “Ultrasound Elasticity Imaging of the Arterial Wall,” Euromech 534 Colloquium (May 29-31, 2012, Saint Etienne, France).
- 6) Yoshifumi Nagai, Hideyuki Hasegawa, Hiroshi Kanai, “Accurate Ultrasonic Measurement of Surface Roughness of Carotid Arterial Wall Using Arterial Longitudinal Displacement,” 6th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics in Sendai (March 8, 2012, Sendai).
- 7) Sho Kageyama, Hideyuki Hasegawa, Hiroshi Kanai, “Suppression of Point Spread Function from Ultrasonic Echoes for Speckle Reduction in the Ultrasonography,” 6th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics in Sendai (March 8, 2012, Sendai).
- 8) Hideyuki Hasegawa, Hiroshi Kanai, “High Frame Rate Ultrasonography for Detailed Analysis of cardiovascular Dynamics,” 18th International Symposium of Tohoku University Global COE Program Global Nano-Biomedical Engineering Education and Research Network Centre (March 5-6, 2012, Sendai).

9) 池下和樹, 長谷川英之, 金井 浩, “Accurate Measurement of Transient Change in Viscoelasticity of Radial Arterial Wall for Evaluation of Endothelial Function,” The 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics (November 8-10, 2011, Kyoto).

10) 北村浩典, 長谷川英之, 金井 浩, “Expansion of Region of Accurate Estimation of Surface Roughness for Application to Carotid Luminal Surface,” The 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics (November 8-10, 2011, Kyoto).

11) 本江和恵, 長谷川英之, 金井 浩, “Visualization of Forward and Reflected Components in Minute Vibration Velocity Waveform of Human Arterial Wall,” The 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics (November 8-10, 2011, Kyoto).

〔図書〕 (計 2 件)

1) Hideyuki Hasegawa, Hiroshi Kanai, Imperial College Press, Nano-Biomedical Engineering 2012, pp. 191-200, 2012.

2) Hideyuki Hasegawa, Jun Yamaguchi, Hiroshi Kanai, American Institute of Physics, Nonlinear Acoustics, pp. 251-254, 2012.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/hkanai/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷川 英之 (HASEGAWA HIDEYUKI)  
東北大学・大学院医工学研究科・准教授  
研究者番号：00344698