

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03835

研究課題名(和文) 動脈硬化症の極早期診断を目指した血管壁の粘弾性特性の計測法に関する研究

研究課題名(英文) A study on measurement method of viscoelastic property of blood vessel wall aiming at early diagnosis of arteriosclerosis

研究代表者

荒川 元孝 (Arakawa, Mototaka)

東北大学・医工学研究科・准教授

研究者番号：00333865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまでに開発した血圧と血管径を同時に計測できる超音波プローブにより得られる血圧・血管径特性から推定される粘弾性率の計測精度について検討し、in vivo実験に適用した。脈波伝播時間法を用いた血圧校正法を検討した。また、超音波プローブによる押圧と血管形状の変化を考慮した弾性率推定法を開発した。生体条件を再現するファントム実験系を構築し、粘弾性率の最低血圧依存性を調べた。さらにin vivo実験において拡張期血圧依存性を調べた。その結果、動脈硬化症の進行に伴う血管壁特性の変化を鋭敏に検出するために、拡張期血圧の計測および拍動下における血管壁粘弾性特性の評価が重要であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動脈硬化症の早期発見のために、血管壁の粘弾性特性の評価が重要である。本研究では、これまでに開発した超音波プローブを用いて計測される血管壁の粘弾性率の測定精度を向上させており、学術的に意義があるといえる。また、ファントム実験とin vivo実験を通して、血管壁の粘弾性率の拡張期血圧依存性を明らかにしており、動脈硬化症の進行に伴う血管壁特性の変化を鋭敏に検出するために、拡張期血圧の計測および拍動下における血管壁粘弾性特性の評価が重要であるという知見も得ており、医学的な意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：We investigated the measurement accuracy of viscoelastic moduli estimated from the relationship between blood pressure and vessel diameter acquired by an ultrasonic probe that can simultaneously measure blood pressure and vessel diameter, which we developed, and applied it to in vivo experiments. A blood pressure calibration method using the pulse wave transit time method was investigated. We developed an elastic modulus estimation method that considers changes in the vascular geometry and pressure applied by the probe. A phantom experimental system was constructed to reproduce in vivo conditions, and the dependence of the viscoelastic moduli on minimal blood pressure was investigated. We examined the diastolic blood pressure dependence in in vivo experiments. Hence, we conclude that measuring both the blood pressure and the elastic and viscous moduli would be beneficial in comprehensively investigating more vessel wall properties that change with the progression of arteriosclerosis.

研究分野：医用超音波工学

キーワード：動脈硬化症 血管壁 粘弾性特性 血流依存性血管拡張反応 超音波プローブ

## 1. 研究開始当初の背景

虚血性心疾患は世界の死因の第1位であり、その主要因として、動脈硬化症が挙げられる。動脈硬化症の極早期段階においては、血管内で血管内皮機能の障害や平滑筋の形質変化が生じる。この段階での病変は可逆的であり、生活習慣の改善や投薬により完治する。しかし、動脈硬化症が進行すると、血管内膜にプラークが生じる器質的変化が起こり、病変は不可逆的となる。このため、動脈硬化症の極早期段階である「血管内皮機能障害」を診断することができれば、動脈硬化症の発症を大幅に減少させることが可能となる。

「血管内皮機能障害」の診断法として、血流依存性血管内皮機能 (Flow Mediated Dilation: FMD) 検査が行われてきた。この検査では、既存の超音波診断装置に描出される断層像上の距離計測機能を用い、駆血解除後の動脈内径の僅か数百  $\mu\text{m}$  の変化を計測し、さらに、数十  $\mu\text{m}$  オーダーの変化の違いによって、正常であるか異常であるか判断しなければならない。使用する超音波の波長が約 200  $\mu\text{m}$  であり、再現性のある計測を行うことが非常に困難である。このため、高感度な「血管内皮機能障害」の診断法が求められている。

## 2. 研究の目的

FMD 検査においては、5 分間の駆血後に血流を再開し、ずり応力に伴って内皮で産生される一酸化窒素(NO)が血管中膜に浸透して平滑筋に作用し、血管を弛緩・拡張させ、そのときに生じる直径変化を計測している。本研究者は、FMD 反応における直接的な変化である血管の弛緩、すなわち粘弾性特性の変化に着目する。これまでに、橈骨動脈において、血圧と血管内径を同位置で同時に計測可能な超音波プローブを開発した。1 心拍中での血管壁の応力(血圧)―歪(内径変化)特性を求め、その結果から、血管壁の内中膜領域の粘弾性特性の計測に成功した。本手法を FMD 反応に適用することにより、FMD 反応による血管の弛緩・拡張を粘弾性特性の差として捉え、血管内皮機能を評価する。FMD 反応に伴う血管壁の粘弾性特性変化を高精度に計測する方法を確立することを目的とした。

## 3. 研究の方法

上記目的を達成するための本研究の課題は以下のとおりである。

- (1) 超音波プローブにより、血圧は電圧値[V]として計測される。圧力値[mmHg]に変換するためには、校正が必要となる。駆血前の安静状態の最初の拍で得られた血圧波形を、市販の血圧計による血圧値で校正し、そのとき得られる校正係数を用いて他の拍のデータを校正している。しかし、駆血による血管壁の特性変化により校正係数が異なる可能性がある。
- (2) 超音波プローブにより血圧波形を計測するためには、プローブを皮膚に押しつけ、血管を潰す必要がある。しかし、押し付ける圧力(押圧)により、計測される血圧波形、内径変化が異なり、得られる弾性率が異なる。
- (3) 健常者と動脈硬化症の初期段階で、粘弾性特性がどの程度異なっているかという臨床的な知見がない。

本研究では、上記の課題を解決するために、①血圧波形の校正方法の検討、②血管粘弾性特性の計測方法の検討、③血管粘弾性特性の計測システムの開発、④水槽実験による計測システムの評価、⑤*in vivo* 計測における計測システムの検証を行った。

## 4. 研究成果

主な研究成果は、以下のとおりである。

### (1) 脈波伝播時間を用いた血圧校正

超音波プローブで取得した血圧波形は電圧として出力されるため、血圧値に校正する必要がある。先行研究[1]においては予め上腕式血圧計で計測した収縮期血圧 $p_{\text{sys}}$ および拡張期血圧 $p_{\text{dias}}$ を用いて血圧波形を校正していたため、計測中に超音波プローブによる押圧が変化すると、取得電圧の絶対値の変化に伴い血圧値が変化するという課題があった。本研究では脈波伝播時間法による血圧推定を導入し、押圧変化によらない血圧計測を可能とした。

脈波伝播時間法の有用性の確認のため、20 代前半の健常男性 3 名を被験者 A-C とし、右橈骨動脈を対象に FMD 反応時における粘弾性計測を行った。開発した 7.5 MHz の超音波プローブを用いて血圧波形と血管径変化を計測した。血管断面を円形と仮定し、血管径変化から血管円周方向のひずみを算出した。血圧―周方向ひずみ特性を Voigt モデルに最小二乗法を用いて整合することで粘弾性率を推定した。まず安静時において 30 秒ごとに 5 分間計測を行い、5 分間駆血し解放した後、15 秒ごとに 5 分間計測を行った。図 1 に FMD 反応中の血圧変化、図 2 に粘弾性率の変化を示す。

図 1 より、すべての被験者において駆血解放後に収縮期血圧 $p_{\text{sys}}$ と拡張期血圧 $p_{\text{dias}}$ が駆血前と比べて約 15 mmHg 低下し、時間の経過に伴って安静時の値付近まで増加した。弾性率の低下に

伴う血管の拡張により、血圧は低下すると考えられるため、この傾向は妥当といえる。一方で、図2より、弾性率と粘性率の推定結果は被験者ごとに異なる傾向を示し、FMDによる血管壁の弛緩を弾性率の低下としては確認できなかった。

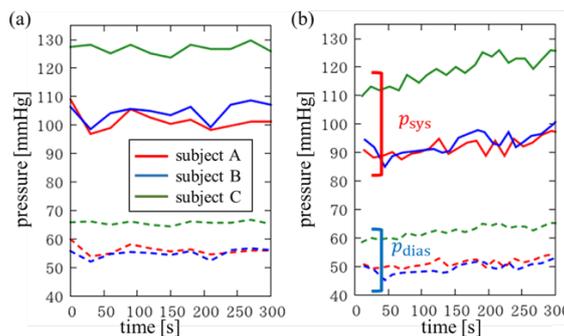


図1 FMD 反応中の血圧の変化 (実線：収縮期血圧, 点線：拡張期血圧), (a) 安静時, (b) 駆血解放後

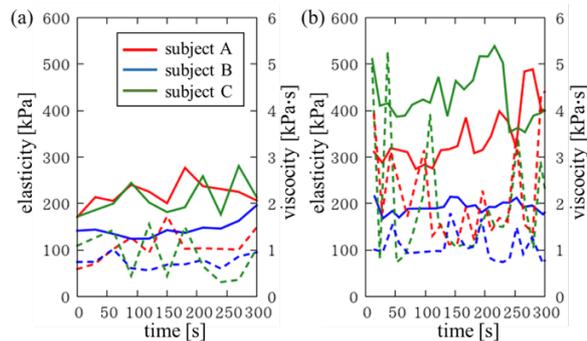


図2 FMD 反応中の粘弾性率の変化 (実線：弾性率, 点線：粘性率) (a) 安静時, (b) 駆血解放後

## (2) 超音波プローブによる押圧と血管形状の変化を考慮した弾性率推定

(1)において弾性率の低下を計測できなかった原因は、弾性率の推定において、超音波プローブによる押圧およびそれに伴う血管形状の変化を考慮できていないことにあると考え、押圧と血管形状の変化を考慮した弾性率の推定式を導出した。変形後の血管断面の形状を楕円と仮定し、血管壁内にかかる貫壁方向応力 $\sigma_r$ 、周方向応力 $\sigma_\theta$ を導出した。超音波により血管の長径および短径、開発した超音波プローブにより血圧、圧力センサにより超音波プローブによる押圧 $p_3$ を計測した。これらから、拡張期から収縮期における貫壁方向増分応力 $\Delta\sigma_r$ 、周方向増分応力 $\Delta\sigma_\theta$ を算出した。超音波によって計測した血管短径の変化から、血管壁の周方向歪み $\Delta\varepsilon_\theta$ を算出した。 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\Delta\varepsilon_\theta$ を式(1)に代入することにより、弾性率 $E$ を推定した。

$$E = \frac{3}{4\Delta\varepsilon_\theta} (\Delta\sigma_\theta - \Delta\sigma_r) \quad (1)$$

導出した式の有用性を確認するため、図3に示す実験系を構築した。図3(b)に示すようなプローブホルダーを製作し、圧力センサを用いて押圧 $p_3$ を計測した。20代前半の健常男性3名を被験者D-Fとし、3通りの押圧 $p_3$ 下において右橈骨動脈を対象に安静時の血圧波形および血管径の変化を計測した。連続する3心拍で、従来法と提案法で弾性率を推定し、比較した。

図4に、1名の被験者Dに対する、提案法および従来法によって推定した弾性率の3心拍間の平均値の関係を示す。従来法では押圧によって弾性率の推定値が全体の平均値から最大で $-36\sim+25\%$ 程度変化してしまうのに対し、提案法では $-7\sim+3\%$ 程度と大幅に小さくなった。提案法により押圧の変化が弾性率推定に与えていた影響を大きく低減できたといえる。しかし、提案法においても押圧を大きいほど、弾性率の推定値がわずかに低下した。この原因の1つとして、ひずみを算出する際に血管断面を円形と仮定していることが考えられる。超音波プローブの押圧により、血管断面は楕円に変形し、押圧を強くするほど楕円のアスペクト比が大きくなる。また、楕円に内圧を付加すると、長径方向よりも短径方向に大きく変形するため、本研究における周方向ひずみの算出式では、楕円が潰れるほどひずみが大きく算出される。一方、ひずみの算出時には円形から円形への変形を仮定しているため、押圧が大きくなり、円形から離れた形状となるほどひずみの算出の誤差が大きくなり、弾性率の推定値への影響が大きくなると考えられる。

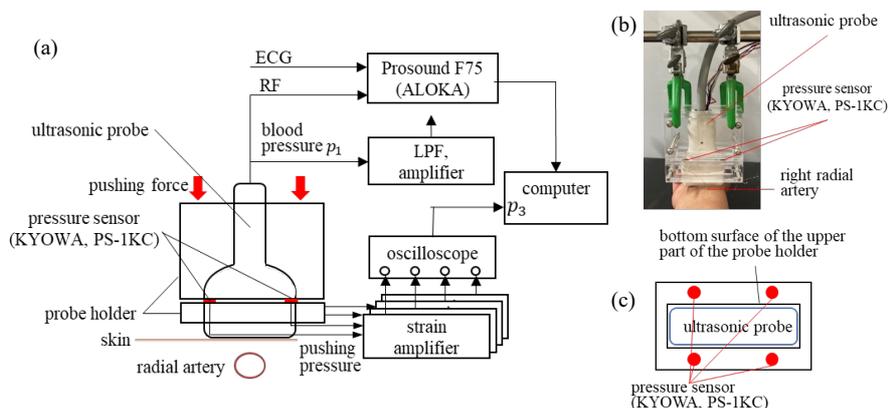


図3 実験系の図 (a) ブロック図, (b) プローブ周辺の写真, (c) 圧力センサの配置

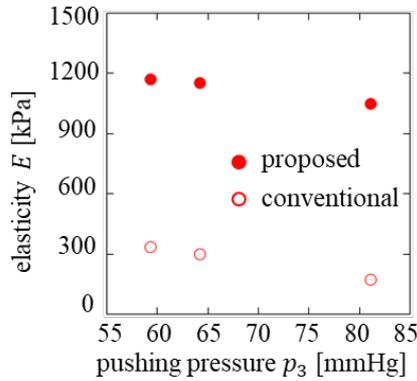


図4 提案法と従来法による弾性率の推定結果

### (3) ファントム実験における最低血圧依存性

ファントム実験の模式図を図5に示す. 生体の条件を再現するために, 閉経路中に水柱を立てて定常的な圧力をかけた. 水柱の高さ $\Delta H$ は, 130 cm (拍動時の最低圧力: 70 mmHg) (生体条件), 100 cm (45 mmHg), 60 cm (20 mmHg), 30 cm (0 mmHg)とした. ファントムの上流側と下流側に設置した圧力センサで圧力波形 $p(t)$ を計測し, ファントムの内径変化を中心周波数 7.5 MHz のリニアプローブを用いて計測した.

図6に, ファントム実験における, (a) 水柱の高さ $\Delta H$ が 130 cm, 100 cm, 60 cm, 30 cm のときの連続する4拍分の内圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の間のヒステリシス特性, (b) 弾性率 $E$ と粘性率 $\eta$ の推定結果を示す. 図6(a)より, 水柱の高さが高くなると, ヒステリシス特性の傾きが大きくなった. また, 準静的な計測での内圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の関係は指数関数で表されるが, 各内圧で計測した内圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の間のヒステリシス特性は, 準静的な計測のように1つの曲線では表されなかった. 図6(b)より, 水柱の高さ $\Delta H$ が 30 cm と 60 cm では, 弾性率 $E$ と粘性率 $\eta$ はほとんど変化しなかったが, 100 cm, 130 cm では内圧が大きくなるにつれて弾性率 $E$ と粘性率 $\eta$ が増加した.

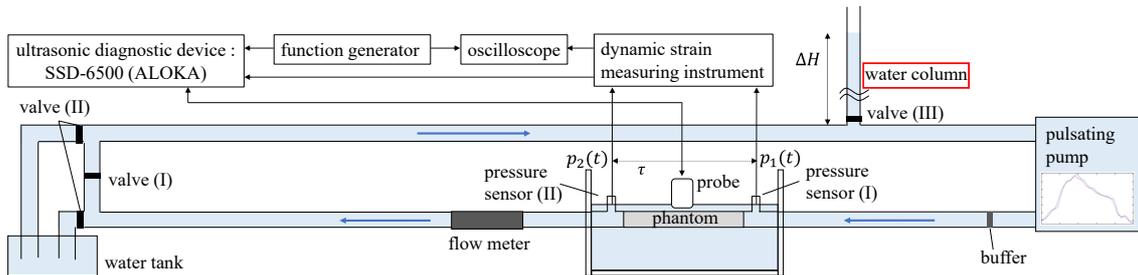


図5 ファントム実験系の模式図

### (4) *in vivo* 計測における拡張期血圧依存性

*in vivo* 実験では, 20代健康者の橈骨動脈を対象に, 開発した超音波プローブを用いて計測した. 血圧の絶対値校正には, 手首で計測できる血圧計を用いた. 異なる拡張期血圧で計測するために, (A) 橈骨動脈が心臓より 20 cm 低いとき( $\Delta H = -20$  cm), (B) 心臓と同じ高さ( $\Delta H = 0$  cm), (C) 心臓より 15 cm 高いとき( $\Delta H = 15$  cm)の3通りで計測した.

図7(a)に, *in vivo* 実験における, (A) 橈骨動脈が心臓より 20 cm 低いとき( $\Delta H = -20$  cm), (B) 心臓と同じ高さのとき( $\Delta H = 0$  cm), (C) 心臓より 15 cm 高いとき( $\Delta H = 15$  cm)のそれぞれの連続する2拍分の血圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の間のヒステリシス特性, 図7(b)に, 弾性率 $E$ と粘性率 $\eta$ の推定結果を示す.

図7(a)では, ファントム実験と同様に, 拡張期血圧が高いほどヒステリシス特性の傾きが大きくなった. 図7(a)中の破線は, それぞれの腕の高さでのヒステリシス特性における, 一心拍中の拡張期血圧の指数関数での近似曲線を示す. 各ヒステリシス特性における拡張期血圧とそのときの内径の関係は, 指数関数で表されることが確認できた. しかし, ヒステリシス特性の傾きは, 点線で示す各ヒステリシス特性の拡張期血圧を通る曲線の傾きより大きくなった.

Voigtモデルでは, 周波数が大きくなると複素弾性率の虚数部が大きくなる. 一心拍内の数 Hz オーダーの血圧変化により複素弾性率の絶対値が大きくなり, ヒステリシス特性の傾きが大きくなったと考えられる. 図7(b)では, ファントム実験と同様に, 拡張期血圧が高くなるほど, 弾性率 $E$ と粘性率 $\eta$ は高く推定され, 弾性率 $E$ と粘性率 $\eta$ に拡張期血圧依存性があることが確認できた.

この結果より、動脈硬化症の進行に伴う血管壁特性の変化を鋭敏に検出するために、拡張期血圧の計測および拍動下における血管壁粘弾性特性の評価が重要であるといえる。

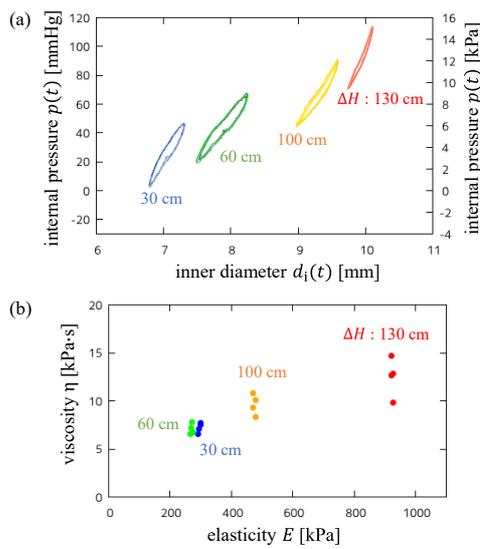


図6 ファントム実験における、(a) 連続する4拍分の内圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ 間のヒステリシス特性、(b) 弾性率 $E$ と粘性率 $\eta$ の推定値。

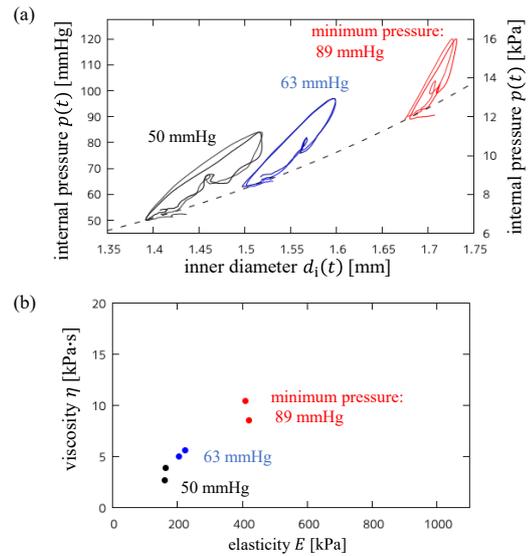


図7 *in vivo* 実験における、(a) 連続する2拍分の血圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ 間のヒステリシス特性、(b) 弾性率 $E$ と粘性率 $\eta$ の推定値。

#### 参考文献

- [1] T. Saito, S. Mori, M. Arakawa, S. Ohba, K. Kobayashi, and H. Kanai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yu Obara, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 69
2. 論文標題 Appropriate window function and window length in multifrequency velocity estimator for rapid motion and locality of layered myocardium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control	6. 最初と最後の頁 1353-1369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TUFFC.2022.3153048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuto Shoji, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Shigeo Ohba, Kazuto Kobayashi, and Hiroshi Kanai	4. 巻 61
2. 論文標題 Accurate measurement of elasticity of the radial artery wall considering changes in cross-sectional shape of artery caused by pushing pressure applied by ultrasound probe	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4e4a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kyohei Higashiyama, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Satoshi Yashiro, Yasushi Ishigaki, and Hiroshi Kanai	4. 巻 61
2. 論文標題 Estimation of aggregate size of red blood cell by introducing reference power spectrum measured for hemispherical ultrafine wire	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenta Kawamata, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 61
2. 論文標題 Improving axial resolution of medical ultrasound images by using noise-robust broadband filter based on singular value decomposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5a2c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taiga Bando, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Eiko Onishi, Masanori Yamauchi, and Hiroshi Kanai	4. 巻 61
2. 論文標題 Transmission conditions for clear depiction of thoracic spine based on difference between reflection and scattering characteristics of medical ultrasound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac51c0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Haji, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Toshio Yamagishi, and Hiroshi Kanai	4. 巻 49
2. 論文標題 Evaluation of local changes in radio-frequency signal waveform and brightness caused by vessel dilatation for ascertaining reliability of elasticity estimation inside heterogeneous plaque: A preliminary study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 539-543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10396-022-01229-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masanori Hisatsu, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 49
2. 論文標題 Application of low-complexity generalized coherence factor to in vivo data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 555-567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10396-022-01243-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mototaka Arakawa, Kyohei Higashiyama, Shohei Mori, Satoshi Yashiro, Yasushi Ishigaki, and Hiroshi Kanai	4. 巻 11
2. 論文標題 In vivo measurement of attenuation coefficient of blood in a dorsal hand vein in a frequency range of 10-45 MHz: A preliminary study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2023.1077696	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 49
2. 論文標題 Lateral M-mode: Ultrasound visualization of displacement along longitudinal direction at intima-media complex	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ultrasound in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 875-888
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultrasmedbio.2022.11.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kana Sugahara, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 60
2. 論文標題 Evaluation of error factors depending on ultrasonic transmitted beamwidth in measurement of myocardial minute velocity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abef0e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seira Akiyama, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 60
2. 論文標題 Accuracy verification in ultrasonic elasticity measurement within intima-media complex visible range using phantom experimental system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abef0d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akiyo Fukase, Kyohei Higashiyama, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Satoshi Yashiro, Yasushi Ishigaki, and Hiroshi Kanai	4. 巻 60
2. 論文標題 Stabilization of red blood cell aggregation evaluation using short-axis view of vein of ultrasound	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf3d5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takumi Hashimoto, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Eiko Onishi, Masanori Yamauchi, and Hiroshi Kanai	4. 巻 60
2. 論文標題 A study on differentiation of depiction between scatterer and reflector to assist epidural anesthesia by ultrasound	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf4a3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aoi Nakayama, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 60
2. 論文標題 Estimation error in sound velocity depending on size of target scatterer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf39e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masanori Hisatsu, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 48
2. 論文標題 Low-complexity generalized coherence factor estimated from binarized signals in ultrasound beamforming	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 259-272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10396-021-01089-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Obara, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 47
2. 論文標題 Strain rate distribution in layered myocardium measured using local velocity estimator with multifrequency phase differences	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ultrasound in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 2768-2773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultrasmedbio.2021.05.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shohei Mori, Hiroshi Kanai, and Mototaka Arakawa	4. 巻 50
2. 論文標題 Speed-of-sound estimation in ultrasound propagation medium by considering size of target scatterer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 151-165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10396-023-01282-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagai Yoshifumi, Mori Shohei, Arakawa Mototaka, and Kanai Hiroshi	4. 巻 62
2. 論文標題 Ultrasonic measurement of thickness of carotid arterial wall using its natural longitudinal displacement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acba26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kaisei Hara, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 62
2. 論文標題 High-speed measurement of two-dimensional displacement of myocardium using element RF data of ultrasonic probe	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acc112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saki Suzuki, Shohei Mori, Masumi Iwai-Takano, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 62
2. 論文標題 Internal pressure dependence on viscoelasticity of arterial wall by ultrasonic measurement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acbf5d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Yamane, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Jens E. Wilhjelm, and Hiroshi Kana	4. 巻 62
2. 論文標題 Ultrasonic measurement of carotid luminal surface roughness with removal of axial displacement caused by blood pulsation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acc07a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Hiroshi Kanai, and Hiroyuki Hachiya	4. 巻 62
2. 論文標題 Quantification of limitations in statistical analysis of ultrasound echo envelope amplitudes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acc33e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mai Yamamoto, Satoru Murakami, Iori Nakamura, Haruhi Ida, Hiromi Masauzi, Keiko Miwa, Kazunori Okada, Sanae Kaga, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Hiroshi Kanai, and Nobuo Masauzi	4. 巻 98
2. 論文標題 The usefulness of a gray-level co-occurrence matrix based on the polar coordinate system for the quantitative evaluation of neutrophil cytoplasmic granules	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 北海道医学会雑誌	6. 最初と最後の頁 81-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Daiki Ouchi, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Tomohiko Shindo, Hiroaki Shimokawa, Satoshi Yasuda, and Hiroshi Kanai	4. 巻 51
2. 論文標題 Optimizing irradiation conditions for low-intensity pulsed ultrasound to upregulate endothelial nitric oxide synthase	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 39-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10396-023-01382-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shohei Mori, Keiji Onoda, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 51
2. 論文標題 Estimation error in speed of sound caused by rotation of measured cross-section from short-axis plane of blood vessels: a preliminary study,	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 49-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10396-023-01383-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Inoue, Yuji Ohashi, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 63
2. 論文標題 Automated mode chart generation for finite element analysis of piezoelectric resonators using principal component analysis based on clustering	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad12f0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuya Komatsu, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 95
2. 論文標題 A novel ultrasonic method for measuring minute sinusoidal displacement by network analyzer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0177846	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Obara, Shohei Mori, Masumi Iwai-Takano, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai	4. 巻 50
2. 論文標題 Influence of Power-Weighted Center of Echo Signal Within Window Function on Local Strain Rate Distribution in Left Ventricular Wall	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Ultrasound in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 768-774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultrasmedbio.2024.01.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Mototaka Arakawa, Yuto Shoji, Shohei Mori, Shigeo Ohba, Kazuto Kobayashi, Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Elasticity measurement of radial arterial wall considering vessel shape change caused by pushing pressure applied by ultrasonic probe
3. 学会等名 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mototaka Arakawa, Kyohei Higashiyama, Rina Takeyama, Shohei Mori, Satoshi Yashiro, Yasushi Ishigaki, Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Estimation of size of red blood cell aggregates using reference power spectra
3. 学会等名 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Obara, Shohei Mori, Masumi Iwai-Takano, Mototaka Arakawa, Susumu Morosawa, Tomohiko Shindo, Hiroaki Yamamoto, Satoshi Yasuda, Hiroaki Shimokawa, Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Local measurement of instantaneous change in myocardial thickness in swine heart during acute myocardial ischemia
3. 学会等名 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒川元孝, 庄司悠人, 森 翔平, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 血管内皮機能評価を目指した単一超音波プローブを用いた動脈壁粘弾性特性の計測
3. 学会等名 日本超音波医学会第95回学術集会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土師佑太, 森 翔平, 荒川元孝, 山岸俊夫, 金井 浩
2. 発表標題 弾性率計測値の信頼性評価を目指した頸動脈粥腫の輝度変化分布の観察
3. 学会等名 日本超音波医学会第95回学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 庄司悠人, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 単一超音波プローブ押圧下における血管形状の変化を考慮した橈骨動脈壁の弾性率計測
3. 学会等名 日本超音波医学会第95回学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木沙綺, 森 翔平, 荒川元孝, 金井 浩
2. 発表標題 超音波を用いた血管粘弾性推定における内圧の影響の検討
3. 学会等名 日本超音波医学会第64回東北地方会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木沙綺, 森 翔平, 高野真澄, 荒川元孝, 金井 浩
2. 発表標題 超音波による血管粘弾性計測値の内圧依存性に関する検討
3. 学会等名 第43回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 諒, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 超音波プローブ押圧下における橈骨動脈の粘弾性特性推定における血管形状計測に関する検討
3. 学会等名 第5回東北地区音響学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木沙綺, 森 翔平, 高野真澄, 荒川元孝, 金井 浩
2. 発表標題 血管壁粘弾性特性の血圧依存性の超音波計測
3. 学会等名 第107回超音波エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 諒, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 橈骨動脈の粘弾性特性推定のための超音波プローブの押圧と橈骨動脈断面形状の関係に関する検討
3. 学会等名 令和5年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 諒, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 血管壁の粘弾性特性推定のための超音波プローブ押圧下における橈骨動脈断面形状の時間変化の計測
3. 学会等名 日本超音波医学会第65回東北地方会学術集会,
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Saki Suzuki, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Importance of compensation of delay time in pressure measurement for accuracy verification system in ultrasonic elasticity measurement of artery wall
3. 学会等名 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Haji, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Toshio Yamagishi, Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Effect of displacement of carotid artery perpendicular to ultrasound beam direction caused by pulsation on ultrasound measurement of local elasticity in plaque
3. 学会等名 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Obara, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Local measurement of myocardial strain rate distribution using multifrequency phased tracking velocity estimator
3. 学会等名 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Mori, Aoi Nakayama, Keiji Onoda, Mototaka Arakawa, Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Preliminary study on estimation of speed of sound in propagation medium considering target scatterer size
3. 学会等名 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Mototaka Arakawa, Takumi Hashimoto, Taiga Bando, Shohei Mori, Eiko Onishi, Masanori Yamauchi, Hiroshi Kanai
2. 発表標題	A novel method for depicting thoracic spine using difference between scattering of muscle tissues and reflection at bone surface
3. 学会等名	2021 IEEE International Ultrasonics Symposium
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	秋山星来, 鈴木沙綺, 森 翔平, 荒川元孝, 金井 浩
2. 発表標題	内腹中膜複合体の可視範囲内における弾性率計測の精度検証
3. 学会等名	日本超音波医学会第94回学術集会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	鈴木沙綺, 森 翔平, 荒川元孝, 金井 浩
2. 発表標題	ファントム実験系における超音波による血管壁の粘弾性計測
3. 学会等名	2021年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	土師佑太, 森 翔平, 荒川元孝, 山岸俊夫, 金井 浩
2. 発表標題	超音波による頸動脈粥腫内部の局所変位計測の信頼性評価法
3. 学会等名	日本超音波医学会第62回東北地方会学術集会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 庄司悠人, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 超音波プローブの押圧による血管断面形状の変化を考慮した橈骨動脈壁弾性計測
3. 学会等名 第42回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土師佑太, 森 翔平, 荒川元孝, 山岸俊夫, 金井 浩
2. 発表標題 弾性率計測の精度向上を目指した頸動脈粥腫内部の局所変位計測結果の信頼性評価
3. 学会等名 第42回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庄司悠人, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 単一の超音波プローブ押圧下における血管形状の変化を考慮した橈骨動脈壁弾性計測
3. 学会等名 第105回超音波エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土師佑太, 森 翔平, 荒川元孝, 山岸俊夫, 金井 浩
2. 発表標題 超音波局所計測による頸動脈粥腫内部組織の性状評価法に関する検討
3. 学会等名 第105回超音波エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Obara, Shohei Mori, Masumi Iwai-Takano, Mototaka Arakawa, and Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Preliminary Study on Ultrasonic Visualization of Myocardial Contraction and Relaxation Based on Local Strain Rate
3. 学会等名 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryota Yamane, Shohei Mori, Mototaka Arakawa, Jens E. Wilhjelm, and Hiroshi Kanai
2. 発表標題 Spatial Frequency Analysis of Luminal Surface Roughness of the Carotid Artery Measured by Ultrasound
3. 学会等名 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木沙綺, 森 翔平, 高野真澄, 荒川元孝, 金井 浩
2. 発表標題 超音波による血管粘弾性特性の内圧依存性のin vivo計測
3. 学会等名 日本超音波医学会第96回学術集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 諒, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 超音波による粘弾性特性計測のファントム実験系における内圧と血管形状に関する検討
3. 学会等名 2023年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 諒, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 超音波計測を用いた血管模擬ファントムにおける圧力と断面形状の関係に関する検討
3. 学会等名 日本超音波医学会第66回東北地方会学術集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 諒, 森 翔平, 荒川元孝, 大庭茂男, 小林和人, 金井 浩
2. 発表標題 超音波による血圧計測のための内圧・プローブ押圧と管断面形状の関係に関するファントム実験系での検討
3. 学会等名 日本音響学会 2024年春季研究発表会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	金井 浩  (KANAI Hiroshi)  (10185895)	東北大学・工学研究科・教授   (11301)	
研究分担者	森 翔平  (MORI Shohei)  (50815149)	東北大学・工学研究科・助教   (11301)	
研究分担者	高野 真澄  (IWAI-TAKANO Masumi)  (60398344)	福島県立医科大学・医学部・特任教授   (21601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------