

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286033

研究課題名(和文) 電磁波波面を制御するためのMEMS二次元可変誘電体素子

研究課題名(英文) MEMS two-dimensional variable dielectric device to control wavefront of electromagnetic waves

研究代表者

松本 潔 (Matsumoto, Kiyoshi)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：10282675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テラヘルツ波やミリ波の波面を制御するため、誘電体材料として液体を使用し、その形状を動的に変形させることで誘電体の厚みを変えて誘電率分布を制御するデバイスの研究開発を行った。MEMS技術を用いて、液体の厚みを大変形することができる流路付き液体アクチュエータデバイスを考案し、特性評価を行った。また、誘電率分布による電磁波の波面変形の解析を行い、波面の偏向、収束が行えることを確認した。さらに機能性デバイスとして、MEMS液体デバイスを応用した可変超音波レンズや、微細構造による波面制御デバイス等の研究開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, to control wavefront of THz-waves or millimeter-waves, a device which can control distribution of the dielectric constant by dynamically deforming the shape of the dielectric liquid was proposed. By using MEMS technology, a liquid actuator device with flow channels which can deform the thickness of liquid was developed. The wave-front's deformation was analyzed and confirmed that waves can be deflected or converged by the permittivity distribution. As application devices, a variable focus ultrasonic lens and a wave-front control device with fine structures were developed.

研究分野：知能機械システム

キーワード：波面制御 誘電率分布 液体アクチュエータ MEMS

1. 研究開始当初の背景

波長 $10\mu\text{m}\sim 10\text{mm}$ の電磁波であるテラヘルツ波・ミリ波は、光の直進性と、空気中の微粒子に影響を受けずに進むという特徴を持つ。そのため、短距離通信やイメージング、車載用レーダなどの探査技術への応用が期待されている。特にイメージングや探査技術では、空間分解能を向上するための波面形状の動的制御、ビーム形状や照射方向の制御が重要であるが、これらの機能を実現する適切なデバイスがなかった。

2. 研究の目的

本研究は、基板内の誘電率分布を動的に変化させることで、基板を通過する電磁波の波面形状を動的に制御可能な MEMS 二次元誘電体素子の実現を目的とする。電磁波が基板を通過するとき、基板の誘電率によって伝播速度が変化する。基板内の誘電率分布を制御できれば、電磁波の通過場所ごとに任意に位相差を生み出し、干渉によって波面形状を変形できる。

3. 研究の方法

本研究では、誘電体材料として液体を使用し、この形状を動的に変形することで基板上の誘電体の厚みを変え、誘電率分布を制御する方法を提案した。この方法を確立するため、(1)マイクロ液滴素子による誘電率分布変化方法の確立、(2)誘電率分布による電磁波の波面変形の解析、の2項目を主たる課題として研究を進め、さらに(3)派生した研究課題、についても研究を進めた。

4. 研究成果

(1)マイクロ液滴素子による誘電率分布変化方法の確立に関連し、以下の研究成果を得た。(1-A)液体厚みを大変形する流路付き液体アクチュエータ

液体厚みの大変形を実現するため、貫通流路を形成した基板上に液体を滴下し、液体表面にパリレン膜を成膜・封止した構造を実現した。貫通流路の周縁部に疎水性膜を形成し、疎水性膜と液体との間の表面張力によって、流路内に液体をとどめている。パリレン膜表面にはアクチュエータ駆動用電極として金薄膜を成膜した(図1-1)。

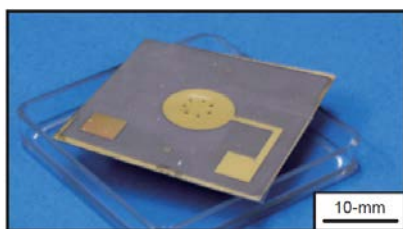
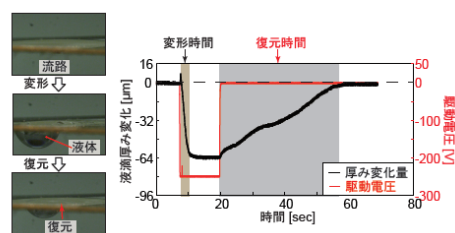


図1-1

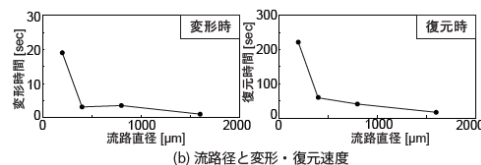
液体アクチュエータは上下電極間に誘電体としてシリコンオイルを挟み込んだコンデンサとなる。このため、上下電極間に電圧を印加して静電気力を印加することができる。この静電気力が貫通流路の表面張力を

超えると、液体が流路より外部に漏れ出し、上下電極間の距離がほぼゼロとなる。一方で、静電気力を除荷すると、疎水性膜の表面張力によって、液体が貫通流路中に押し戻される。アクチュエータ内の液体を外部に押し出すことで、構造を大変形することが可能となる。

このとき流路設計の指針を確認するため、直径 $200\sim 1600\mu\text{m}$ までの異なる大きさの貫通流路を有する液体アクチュエータに $0\sim 250\text{VDC}$ の電圧を印加した際の印加電圧とアクチュエータ中央部の厚みの関係を計測した結果を図1-2(a)に示す。この結果から静電気力が表面張力を上回った瞬間に体が流路外部に流出してアクチュエータ厚みが一気に減少し、静電気力を除荷した際に静電気力を表面張力が上回ることで液体が流路中に戻ることを確認した。



(a) アクチュエータの変形・復元の様子

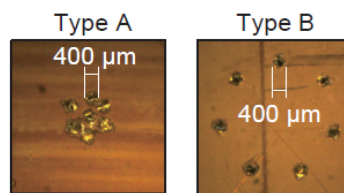


(b) 流路径と変形・復元速度

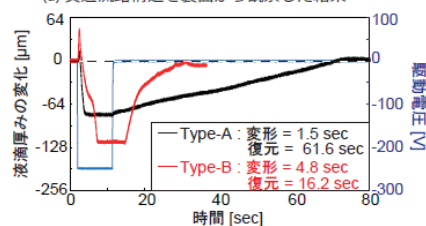
図1-2

また電圧を印加した後、アクチュエータの変形・復元時間を計測したところ、流路面積を直径 $1600\mu\text{m}$ まで増大することで、変形時間を 1sec 、復元時間 10sec に短縮できることを確認した(図1-2(b))。

流路の配置と変形・復元速度の関係を評価するため、7個の直径 $400\mu\text{m}$ の貫通流路をアクチュエータに形成し、その配置と変形・復元速度の関係を計測した(図1-3(a))。



(a) 貫通流路構造を表面から観察した結果



(b) 各配置での流路変形・復元速度

図1-3

このとき変形時間は Type-A の配置が 1.5sec 、Type-B の配置が 4.8sec となり、Type-A の場合の方が Type-B の場合よりも3倍程度速い。一方、復元時間は、Type-A の場合は

61.6 sec, Type-B の場合は 16.2 sec となり、Type-B の配置の方が 4 倍程度速い。この結果は、変形・復元速度と流路配置の間にトレードオフが存在することを示している。

(1-B) 誘電体厚みの制御方法の確立

誘電体の厚みを制御する方法として、アクチュエータ上下電極間の静電容量を駆動と同時に計測する方法を確立した。この方法では、試作したアクチュエータが低電圧・高周波数の信号に対しては追従しないことを利用する。駆動用の低周波数・高電圧 (DC, 0~150V) の信号と、静電容量計測用の高周波数・低電圧 (100KHz, 3.0V) の信号とを重畳した信号をテスト用アクチュエータ印加した。テスト用アクチュエータとしては、変形の計測を容易にするために液体アクチュエータを用いたレンズ構造を使用し、その焦点距離の変化量からレンズの変形を確認した。

試作したテスト用アクチュエータの焦点距離変化量と静電容量、印加電圧の関係を計測・評価した結果を図 1-4 に示す。この結果から、静電容量に基づくことで提案した液体アクチュエータの形状をヒステリシスなく求めることができることを確認した。

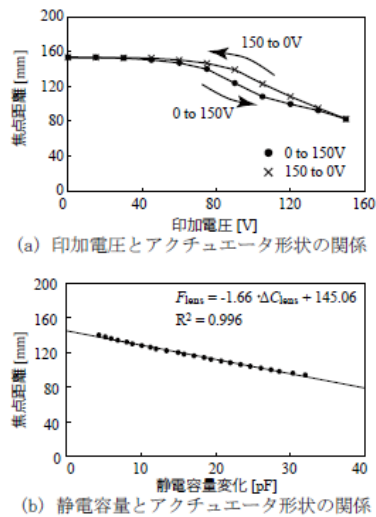


図 1-4

(1-C) 液体アクチュエータアレイ化構造形成方法の確立、MEMS 二次元誘電体素子の試作

アクチュエータアレイ構造の形成方法を確立するため、シリコン基板を利用してアレイ化プロセス方法を検証した。幅 $400 \mu\text{m}$ の金配線上にピッチ 3mm で直径 1mm の疎水性膜リングを形成した。リング中央に直径 $200 \mu\text{m}$ の貫通流路を形成し、その流路内壁に疎水性層を形成した。このリング内にシリコンオイルを滴下し、表面に厚み $1 \mu\text{m}$ のパレンならびに厚み 50nm の金薄膜を成膜した。その後、構造表面に塗布したレジストをマスクとして利用して金薄膜を下部金配線と直交するようにパターンニングし、アレイ構造を実現した (図 1-5)。単一のアクチュエータを駆動するため、上面の金薄膜一本と下部配線一本を選択し、両者間に電圧を印加することで、特定箇所より液滴をアクチュエータ外部に吐出する構造を実現した。

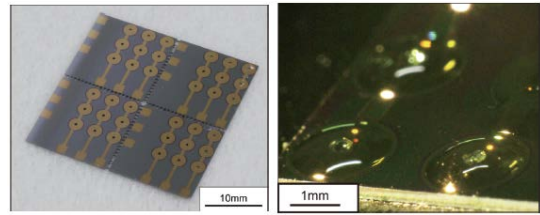


図 1-5

(2) 誘電率分布による電磁波の波面変形の解析に関連して、以下の研究成果を得た。

(2-A) 誘電率分布に対する電磁波波面形状の解析

・トポロジー最適化

電磁波伝播問題の周波数領域の支配方程式は、マックスウェル方程式から導出される波動方程式を周波数領域に展開したヘルムホルツの波動方程式で記述される。電磁波伝播問題はマックスウェル方程式の時間依存の式により記述され、それらは周波数領域に展開され計算に用いられる。この波動法的式が、電界の状態変数についての支配方程式となる。本研究では電磁波をコリメートしたり、その焦点距離や焦点を結ぶ方向を変えるが、その変化した場合の電界分布を最適化解とする。このとき、目的の電界分布と設計中の電界分布の差が目的関数となるが、重みづけを行い、またグレースケール問題を回避するためのペナルティ関数を導入して最適化解を求めやすくするための工夫を行った。

・レンズの構造最適化

波源に、点波源を用い、コリメートさせるためのレンズの設計モデルを図 2-1 に示す。図の設計領域が、密度法を用いたトポロジー最適化を進める領域となる。レンズの比誘電率は Si を想定して 11.7、空気は、1 としている。この最適化の結果、図 2-1 の下にあるようにレンズ形状が設計された。そのレンズを点波源からの電磁波が通過すると、点波源からの電磁界がレンズによりコリメートされる。図 2-2 に、解析結果の電磁界の遠方解を縦軸に、偏角 (Deflection angle) を横軸にしてグラフに示した。最適化されたレンズにより点波源から入射された電磁波は、平面波にコリメートされ、遠方解でも平面波源の結果に、ほぼ等しくなる。このように、最適化手法を用いることで誘電体の配置を最適化でき、レンズ構造が設計できる。

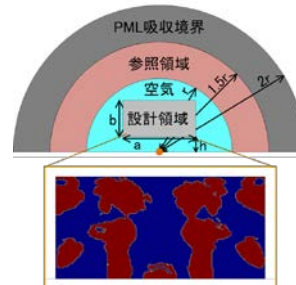


図 2-1

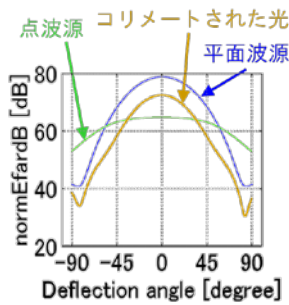


図 2-2

(2-B) ラージスケール誘電体素子の設計

・電磁波ビームの焦点制御

電磁波や熱などを伝播や放射を制御するためには、空間における流動性材料の配置・分布を変化させる必要がある。具体的な流動性材料の配置や形状に関しては、電磁界解析や熱解析の逆問題が解ける構造最適化手法を用いることで、予め最適な構造を得ることができる。ここでは、ミリ波（周波数 76GHz）の伝播を制御する。波源からのミリ波ビームをある焦点に集めたり、2 つに分けたり、平面波として指向性を鋭角化させることをねらう。図 2-3 の示すような形状に誘電率 2.2 の誘電体（黒）に配置することで、ビームの伝播特性が所望の状態（ここでは、フォーカシングの状態）に制御できることを、構造最適化手法で予め算出しておく。それぞれ求めた形状に従い、液滴の出し入れを位置に応じて行うことで、複数セル液滴構造デバイスの横から電磁波を入射したときに、形状可変誘電体レンズアンテナとなる。横方向から、ミリ波（周波数 76GHz）を透過させたシミュレーションを行ったところ、それぞれ、図 2-4 に示すように、焦点位置や指向性が変化することを確認した。

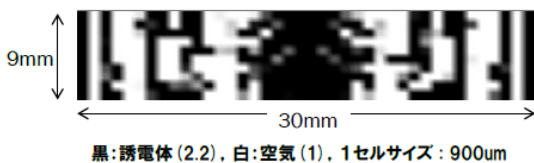


図 2-3

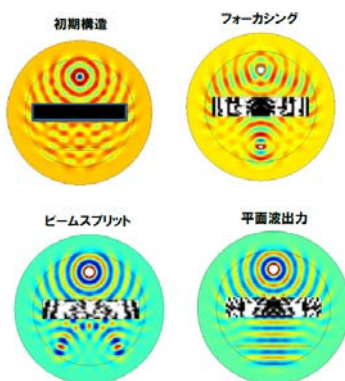


図 2-4

・アレイ状にならんだアンテナの放射制御によるミリ波のビーム制御

図 2-5 に示すように、液滴変形によるアク

ティブパッチアンテナをアレイ状に並べ、そのアレイ状にならんだアンテナの放射や反射のパターンを幾何学的に変化させるとビーム制御が可能になる。これは、アンテナと地板との流動性液体の配置・分布が変わると、周波数特性や指向性も変化する。それらを配置場所ごとに個別に時間ごとに変化させることで、フェーズドアレイの動作が可能になる。フェーズドアレイの動作をシミュレーションすると図 2-6 に示すようになる。±7.5° のビーム走査(24GHz)ができることが見積もられた。

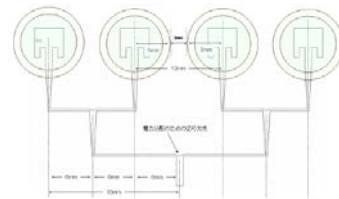


図 2-5

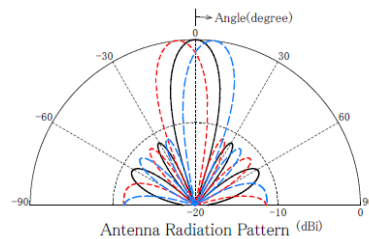


図 2-6

・周期的に配置したスルーホール液滴の出し入れによるミリ波制御

基板にスルーホールを周期的に形成し、そこに液滴を出し入れすることで、誘電体の配置を変型させるという構造が考えられる。誘電率の分布が変化するので、透過するミリ波（24GHz）の進行方向などを制御できる。図 2-7、図 2-8 に、スルーホールに液滴を出し入れしたときの、ミリ波の透過状態を解析した結果を示す。スルーホール内に空気があるときには、空気と基板の材料との誘電率の差が大きく、ミリ波が±40° に回折する。これに対して、液滴が充填されているときには、スルーホールの内部と外部の誘電率の差がほとんどなく、入射したミリ波がそのまま透過することがわかる。また、図 2-9 に示すように、スルーホールの液滴の充填量を周期的に徐々にかえることで、フェーズドアレイが実現でき、ミリ波ビームの走査が可能になることもわかる。

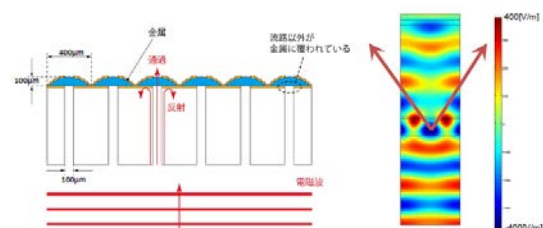


図 2-7

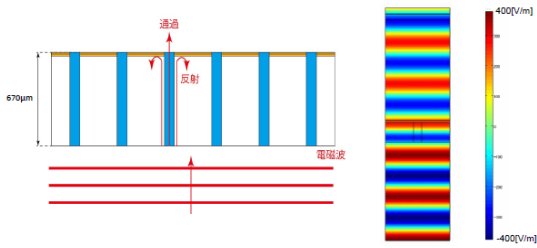


図 2-8

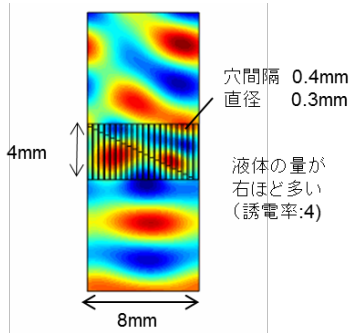


図 2-9

(2-C) 電磁波波面の 2 次元形状を計測する近傍電磁界計測システム

試作したデバイスを通して電磁波の 2 次元形状を計測するため、光電界プローブの位置を動的かつ三次元的に移動できる近傍電磁界計測システムを試作する必要がある。ミリ波の検出には、図 2-10 で示す光電界プローブのシステムを用いる。ミリ波は、任意の周波数を信号発生器で発生させ、増幅後にアンテナから発信させる。このミリ波をデバイスに透過させ、それを光電界プローブで受信し、O/E 変換器で電気信号に変換させスペクトルアナライザで検知する。

この光電界プローブを手動で XYZ 方向に動かすことで、電磁波の波面形状を 3 次元的に計測できる。ここで、既存の計測装置の周波数帯域と試作するセルのサイズが数百 μm ~ 1mm 程度であることから、制御するミリ波の周波数が、数 GHz から 10GHz であれば、計測が良好に行える。

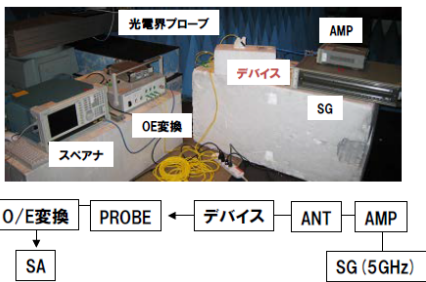


図 2-10

(3) 派生した研究課題に関連して、以下の研究成果を得た。

(3-A) 液中音源を計測する可変超音波レンズ
本研究の液体アクチュエータを応用して、液体中の音を所望の点に集束させる方法可変超音波レンズを開発した。

可変超音波レンズの動作を、図 3-1 を用いて説明する。液体アクチュエータの PDMS と

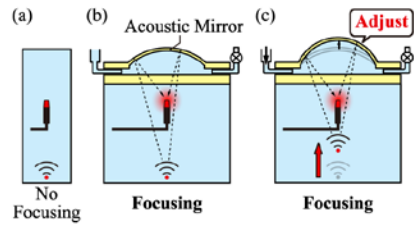


図 3-1

空気の界面は、音響ミラーとして動作する。界面は曲率を持つためレンズとして働き、水中の音源からの音は一点に集まる。曲率を変えること、音の収束位置が変化する。

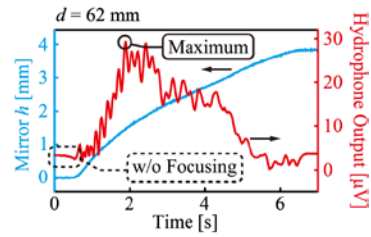


図 3-2

実験の結果を図 3-2 に示す。レンズとマイクの距離は 62mm、レンズの直径は 20mm で、高さを変えたときのマイクの出力を測定した。レンズ高さが 1.5mm のとき出力が最大となり、曲率により収束位置が可変となっていることを確認した。

(3-B) 超音波振動計測用の広帯域音響センサ
液体を封止した構造の下部に、ピエゾ抵抗部を持つ薄膜梁による振動検出部を設けた構造で、広帯域の音響センサを実現した。

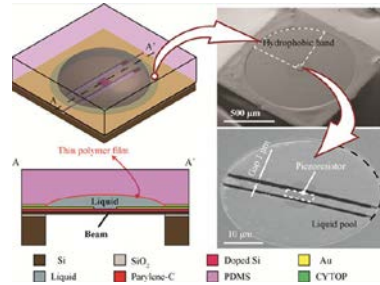


図 3-3

音響センサの構造を図 3-3 に示す。振動検出部は MEMS プロセスで製作した $0.3 \mu\text{m}$ 厚のピエゾ抵抗型ビームで、液体は $1 \mu\text{m}$ のパリレン薄膜で保持されている。試作したデバイスでは、1MHz 程度の高い周波数まで、振動検出感度を持っていることがわかった。

(3-C) 表面可変構造を用いたテラヘルツ波面制御デバイス

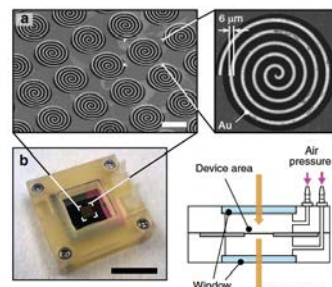


図 3-4

図 3-4 は、微小なスパイラル構造を、空気圧で偏向させることで、テラヘルツ波の偏向を制御するデバイスである。実験の結果、1.1THz の電磁波において、 28° の変更回転が確認された。

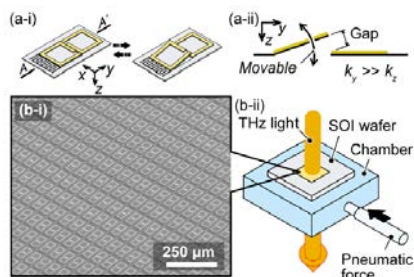


図 3-5

図 3-5 は、カンチレバー上にコイルを形成し、対抗コイルとのギャップを空気圧で制御することで、テラヘルツ波の偏光透過率を制御するデバイスである。ある偏光に対して、透過ディップ周波数を 0.82~0.92THz で調整可能であることが確認された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Kentaro Noda, Makoto Ohkado, Nguyen Binh-Khiem, Kiyoshi Matsumoto, Hisayoshi Fujikawa, Isao Shimoyama, “Frequency-Tunable Microstrip Antenna With Liquid Actuator Using Gradually Widened Transmission Line,” *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, 査読有, vol.14, 2015, pp.25797-25804

DOI:10.1109/LAWP.2014.2369521

[学会発表] (計 7 件)

① 菅哲朗, 安食嘉晴, 松本潔, 下山勲, “Au/Si ナノピラーアレイを用いた近赤外光シリコン型フォトディテクタ,” 第 33 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2016 年 12 月 23-26 日, 平戸文化センター (長崎県平戸市)

② Takahiro Omori, Takashi Usui, Kazuo Watabe, Minh-Dung Nguyen, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, “Elastic wave measurement using a MEMS AE sensor,” 8th International Conference on Acoustic Emission, Dec.5-9, 2016, 京都テルサ (京都府京都市)

③ Tetsuo Kan, Yoshiharu Ajiki, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, “SI PROCESS COMPATIBLE NEAR -INFRARED PHOTODETECTOR USING AU/SI NANO -PILLAR ARRAY,” The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '16), Jan.24-28, 2016, Shanghai (People's Republic of China)

④ Ryo Aoki, Yusuke Takei, Nguyen Minh-Dung, Tomoyuki Takahata, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, “DETECTION OF HIGH-FREQUENCY COMPONENT OF MECHANO-MYOGRAM,” The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '16), Jan.24-28, 2016,

Shanghai (People's Republic of China)

⑤ Q.-K. Pham, M.D. Nguyen, K. Matsumoto, I. Shimoyama, “ACOUSTIC EMISSION SENSOR USING LIQUID-ON-BEAM STRUCTURE,” The 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), June.21-25, 2015, Anchorage (USA)

⑥ Ryo Aoki, Nguyen Thanh-Vinh, Kentaro Noda, Tomoyuki Takahata, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, “SOUND FOCUSING IN LIQUID USING A VARIFOCAL ACOUSTIC MIRROR,” The 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '15), Jan.18-25, 2015, Estoril (Portugal)

⑦ T. Kaneko, N. Minh-Dung, P. Quang-Khang, Y. Takei, T. Takahata, K. Matsumoto, I. Shimoyama, “PULSE WAVE MEASUREMENT IN HUMAN USING PIEZORESISTIVE CANTILEVER ON LIQUID,” The 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '15), Jan.18-25, 2015, Estoril (Portugal)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://www.leopard.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 潔 (MATSUMOTO, Kiyoshi)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号: 1 0 2 8 2 6 7 5

(2) 研究分担者

野田 堅太郎 (NODA, Kentaro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号: 0 0 5 4 7 4 8 2

(3) 連携研究者

藤川 久喜 (FUJIKAWA, Hisayoshi)

株式会社豊田中央研究所・戦略研究企画推進室・主任研究員

研究者番号: 6 0 3 9 4 6 6 5

大門 真 (OOKADO, Makoto)

株式会社豊田中央研究所・電波応用研究室・副研究員

研究者番号: 7 0 4 4 3 8 1 9

野村 壮史 (NOMURA, Tsuyoshi)

株式会社豊田中央研究所・マルチフィジックプログラム・主任研究員

研究者番号: 8 0 3 9 4 8 2 3