

令和元年6月18日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14183

研究課題名(和文) シリカ凝集体エレクトレットを用いた印刷可能なフレキシブル超音波センサアレイの開発

研究課題名(英文) Development of printable and flexible ultrasonic-sensor-array using silica-agglomerate electret

研究代表者

蔭山 健介 (KAGEYAMA, Kensuke)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30272280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：PTFEとシリカ凝集体を用いることで4 μ m程度の極薄で高い電荷保持特性を示し、レーザー照射により微細パターンニングが可能なエレクトレットを作製することができた。このエレクトレットは、エレクトレットコンデンサセンサ(ECS)の性能向上に寄与できると考えられる。一方でシリカ凝集体エレクトレットを用いたフレキシブルECSを用いて円筒形状で空中超音波センサアレイを製作したところ、特に近距離の全方位での物体位置検出に優れた性能を示すことが明らかとなった。また、このECSはパルス圧縮法と呼ばれる周波数変調による性能向上も可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極薄で電荷保持特性に優れたエレクトレットを作製でき、フィルム素材を用いてエレクトレット素子を製作することで柔軟に変形可能な空中超音波センサが製作可能であることが示された。また、このエレクトレットはレーザー加工可能であり、微細パターンニングされた空中超音波センサアレイの製造可能性が示された。これらの成果から、特に近距離での全方位での物体検出に適した超音波センサが開発可能と考えられ、指の動きをワイドレンジかつ非接触でトラッキング可能なモーションセンシング等の空中超音波を用いたセンシング技術の向上が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Ultrathin electret less than 4 μ m which exhibited high electric charge retention and fine patterned by laser irradiation was obtained using PTFE and silica agglomerates. It is considered that this electret could contribute to the performance improvement of an electret condenser sensor (ECS). On the other hand, an airborne ultrasonic sensor array was fabricated in a cylindrical shape using flexible ECS using a silica aggregate electret and demonstrated the excellent performance in object position detection in omni-directions, especially at a short distance. In addition, it was shown that this ECS can also improve the performance by frequency modulation called pulse compression method.

研究分野：非破壊評価

キーワード：エレクトレット 超音波センサ 空中超音波 微細パターンニング 物体検出

1. 研究開始当初の背景

超音波を用いたセンシング技術は、固体中および水中においては圧電素子を用いたフェイズドアレイ医療用および非破壊検査用機器やランジュバン振動子を用いた超音波洗浄などに広く使用されている。超音波センサーは圧電素子が主に用いられているが、空気を媒質とする空中超音波の送受信においては圧電素子の高い音響インピーダンスが送受信効率を大幅に低下させる問題がある。その結果、空中での超音波の利用は、圧電素子ではセンサアレイを大型化せざるを得ず、素子が破損しやすいこともあり、さまざまなセンシング・アクチュエーション技術が提案されているが、実用化が困難な状況である。

一方、研究代表者は、マイクロフォンとして広く使用されているエレクトレットコンデンサマイク（ECM）の技術を応用して、マイクロギャップを有する薄型のフィルム積層 ECS の開発を行ってきた。FilmECS は、従来の ECM よりギャップ幅が大幅に減少することで高周波数帯域における送受信感度が向上し、空中での超音波の送受信を行うことが可能である。さらに、コロイダルシリカを塗布・乾燥させることで形成したシリカ凝集体をエレクトレットとして用いることで耐熱性が向上することも明らかとなった。他の超音波センサと比較して FilmECS の特長は薄く、折り曲げ可能なほど柔軟であり、形状自由度が高いことにある。そこで、申請者はこの特長を活かして微細にパターンニングした FilmECS を開発すれば、超音波センシング技術の画期的な向上が期待できると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の2つである。

- (1) フッ素樹脂とコロイダルシリカを印刷技術により基板上に簡便かつ自由にパターンニングできる、超音波を送受信可能な FilmECS アレイを開発する。
- (2) 上記 FilmECS アレイを用いた指の動きを検出可能なモーションセンサー、小型化した触覚ディスプレイのポテンシャルを明らかにする。

本研究では、空中超音波センサアレイとしてエレクトレットに注目した。それは、エレクトレット素子を構成する材料であるフッ素樹脂およびシリカ凝集体は容易に印刷可能であるためである。さらに、フィルム素材を用いてエレクトレット素子を製作すれば、折りたたみ可能な柔軟性も有する。このような素子が印刷技術により製作可能であれば、これまで不可能であった微細パターンニングされたフレキシブル空中超音波センサアレイを開発できるようになる。エレクトレットは、小型化しやすいことからこれまでマイクロフォンとして用いられたり、MEMS 技術によりシリコン基板上に実装した環境発電デバイスなどが開発されている。それに対して、本研究では印刷技術を活用することで微細化と柔軟性を両立させることが新たなチャレンジとなる。

3. 研究の方法

(1) 極薄シリカ凝集体エレクトレットの作製

スピコートにより電極表面にポリテトラフルオロエチレン (PTFE) ディスパーションおよびコロイダルシリカの塗布を行った。そして焼成後、コロナ放電によりシリカ凝集体をエレクトレット化した。この超音波送受信特性を調べるとともに、エレクトレット層の薄膜化および微細化を行った。FilmECS アレイのポテンシャルを高めるためには、PTFE 層およびシリカ凝集体を可能な限り薄膜化することが望ましく、厚さ $5\mu\text{m}$ 以下のギャップを目指した。

(2) PTFE およびシリカ凝集体エレクトレットのレーザー加工による微細パターンニング

CO₂ レーザを用いて、シリカ凝集体および PTFE 層の微細パターンニングを行い、レーザー照射がエレクトレットの電荷保持特性に及ぼす影響を調べた。レーザー加工を用いた微細パターンニングにおける最適な加工条件を見出すために、PTFE やコロイダルシリカのスピコート条件、レーザー加工における出力やスキヤニング速度、レーザー加工、仮焼、焼成の手順などに注目して微細パターンニングエレクトレットの製作手順が、エレクトレットの電荷保持特性に及ぼす影響を調べた。

(3) FilmECS および FilmECS アレイの作製と特性評価

極薄エレクトレットを用いた ECS を製作し FilmECS および FilmECS アレイの作製と特性評価を行い、極薄化が空中超音波の送受信特性に及ぼす影響を調べた。そして、フレキシブル ECS 素子を製作し、円筒に巻きつけることで、フレキシブル ECS アレイを製作した。そして、ECS アレイ前方にアクリル円筒を設置し、その位置検出を行った。さらに、周波数変調したチャープ波を送信子に入力することで空中超音波の送受信を行い、アクリル円筒が送信子の正面に位置するときの送信子上部に取り付けた受信子により測定された送受信波形をレファレンス波形とすることでパルス圧縮を行った。そして、パルス波、バースト波についても同様の測定を行うことで、位置検出精度を比較し、チャープ波を用いたパルス圧縮の有効性を調べた。

4. 研究成果

(1) 極薄シリカ凝集体エレクトレットの作製

下記のサンプルを作製して、エレクトレット化した。

P2: PTFE ディスパーションをスピ
ンコートした後 250°Cで仮焼
を2回繰り返し、500°Cの電気
炉を用いて急速焼成した。

P3: P2のスピコートに3回繰り返
した。

S2: PTFE ディスパーションのスピ
ンコートと仮焼を2回行った
後、コロイダルシリカをスプレ
ー塗布することでシリカ凝
集体を形成して、仮焼と焼成
を行った。

S3: PTFE ディスパーションのスピ
ンコートと仮焼を3回行った
後、S2と同様にシリカ凝集体
を形成して、仮焼と焼成を行
った。

C2: PTFE ディスパーションのスピ
ンコートと仮焼を1回行った後、再度 PTFE ディ
スパーションをスピコートし、仮焼を介さずにコロイダルシリカをスプレ
ー塗布してシリカ凝集体を形成して、仮焼と焼成を行った。

表 1. 作製したサンプルの電荷保持特性

	E_e [MV/m]		
	After charging	24 h after at RT	At 250°C
P2	104	71	25
P3	56	47	27
S2	104	100	41
S3	56	55	38
C2	104	100	71

上記のサンプルの常温および 250°Cでの電荷保持特性（表面電位と厚さから算出されて、エレクトレットの内部電界強度）を示す。シリカ凝集体を形成することで、明らかに電荷保持特性が向上しており、C2 サンプルが最も良好な電荷保持特性を示した。

(2) PTFE およびシリカ凝集体エレクトレットのレーザ加工による微細パターンニング

下記のサンプルを作製して、エレクトレット化した。

P: PTFE ディスパーションをスピコートした後 250°Cで仮焼を行い、500°Cの電気
炉を用いて急速焼成した。

PL: P を作製後、CO₂ レーザ (40W, 連続波) を用いて、PTFE 表面に 1mm ピッチの格
子状にレーザを照射して、アブレーションにより溝を形成させた。

C200: PTFE ディスパーションのスピコートと仮焼を1回行った後、PTFE ディス
パーションにより 200 倍に希釈したコロイダルシリカのスピコートを行い、
仮焼と焼成を行った。

CL200: C200 を作製後、PL と同様にレーザ照射を行った。

上記のサンプルのエレクトレット化後の電荷保持特性の経時変化を図 1 に示す。P および PL については、レーザ照射による電荷保持特性の劣化は認められず、レーザ出力が弱い場合電荷保持特性が向上する傾向が認められた。これは、急速焼成時の熱残留応力が解放されたことが原因と考えられる。

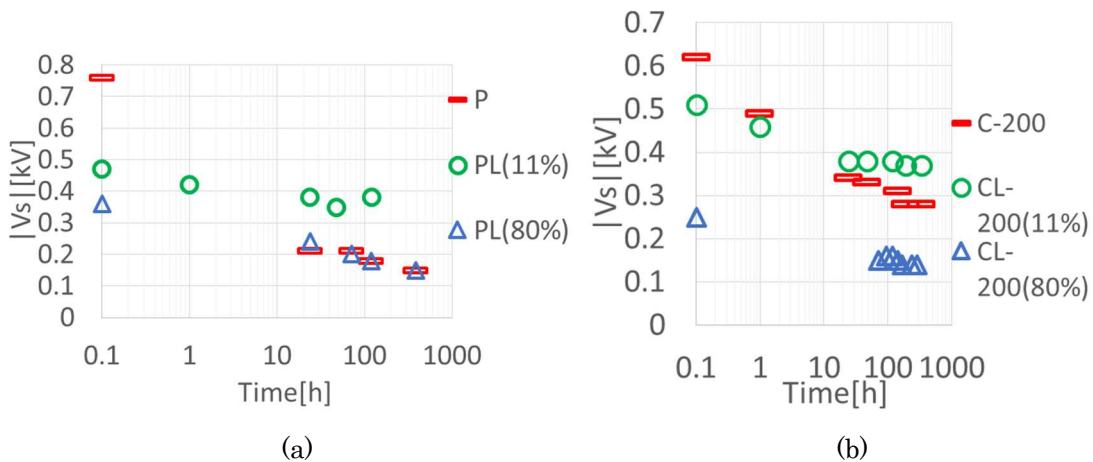


図 1. レーザ照射したサンプルの電荷保持特性; (a) PTFE エレクトレット (b) PTFE/シリカ凝集体複合エレクトレット (括弧内の数値は、レーザの出力を示す)

一方、C200 および CL200 については、レーザ照射の出力が強いと電荷保持特性が大きく低下した。これは、シリカ凝集体が含まれることでレーザ照射によるエレクトレット層の熱影響が増大したのではないかとと思われる。一方、低出力のレーザ照射であれば、無処理のサンプルと同等の電荷保持特性が得られたことから、レーザによる微細パターンニングにより、均一なマイクロギャップを形成できる可能性が示された。また、PTFE 単一の層であればレーザ照射による電荷保持特性の劣化は認められないことから、ECS においてエレクトレット層に対向する電極の絶縁層である PTFE 層をレーザにより微細パターンニングしてマイクロギャップを形成することも考えられ、今後検討する予定である。

(3) FilmECS および FilmECS アレイの作製と特性評価

厚さ $10\mu\text{m}$ の Al フィルムを電極として用い、(1)において作製した C2 をエレクトレット層として、対向する電極側を(2)において製作した P を絶縁層として、ECS を製作した。1つの送信子と3つの受信子を製作し、それぞれ図2に示すように径 32mm の PVC 円筒表面に貼り付けた。このとき、送信子は全周に超音波を送信できるようにして、受信子は互いに円筒中心に対して 60° の角度となる位置に設置した。また、別の PVC 円筒検出対象物として ECS アレイ前方に置き、バースト波 (波数 5, 両振幅 100V) を送信子に入力して超音波を送信した。そして、検出対象物からの反射波を各受信子で測定し、検出された波形の到達時間差を用いて位置検出を行った。この際、到達時間差がセンサや検出対象物の大きさの影響を受けるために、下記の2つの方法で補正を行った。

方法 A: 2つの受信子の信号強度 (両振幅) の強度比から角度 θ を算出し、あらかじめ求めた角度 θ による到達時間の変化の関係から、到達時間差を補正して、物体までの距離 D を推定した。

方法 B: 一定の値を用いて到達時間差を補正して、物体までの距離 D と角度 θ を推定した。

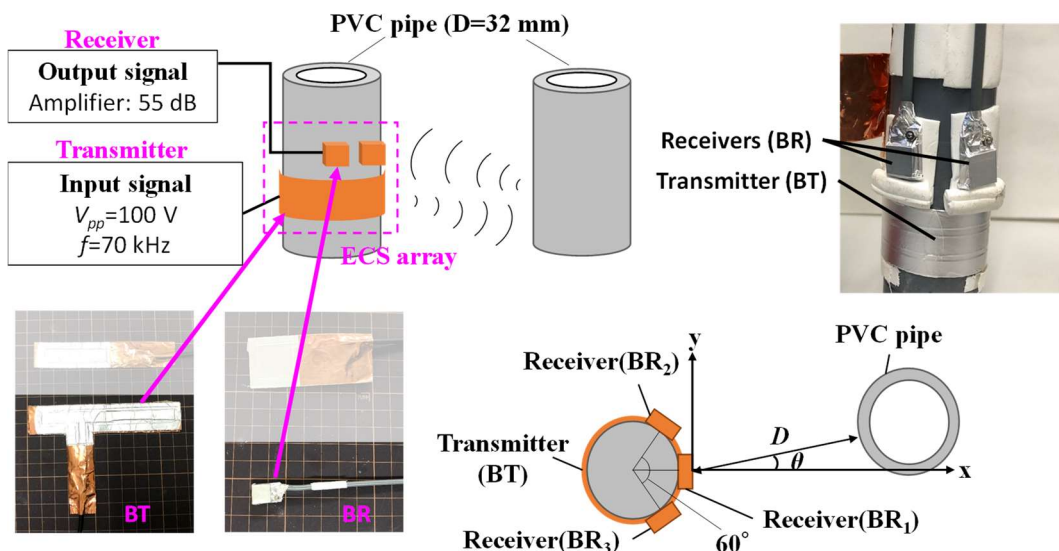


図2. 製作した円筒形状の ECS アレイの概念図と検出対象物との位置関係

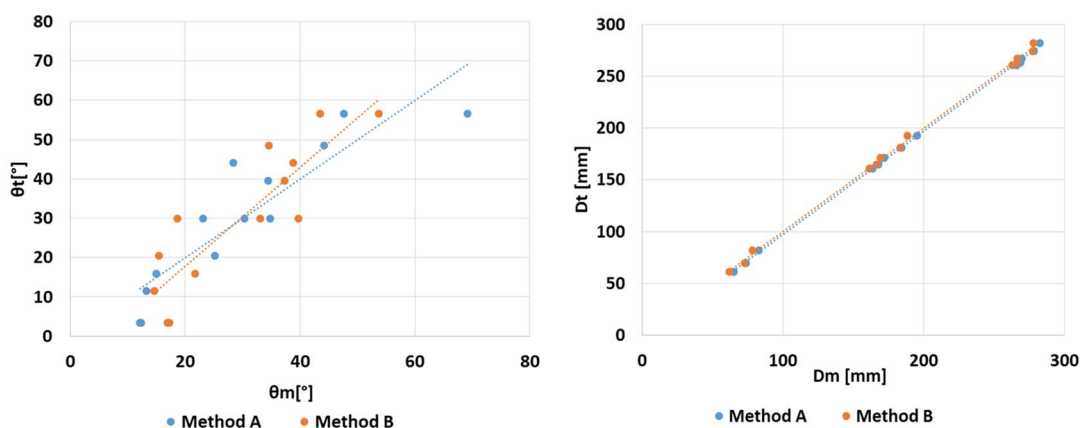


図3. 物体位置検出結果の比較; θ_m および D_m は推定された物体位置の角度と距離, θ_t および D_t は真の物体位置の角度と距離を示す。

図3に、推定された物体位置と真の位置との比較を示す。AとBのいずれの方法でも物体までの距離 L については高い精度で推定することができた。一方、角度については、大きなばらつきが生じた。これは、超音波が円筒全周から同時に発振されたため、受信子が検出した超音波の送信位置が異なっていることが原因と考えられる。そのため、送信子も複数の素子に分割して、個別に送信することで、角度の測定精度が向上すると考えられる。

そこで、次に送信子を3に分割し、受信子を送信子の上下5個に設置したECSアレイを製作した。製作したECSアレイの概念図を図4に示す。送信子は図2の受信子と同じ位置に取り付け、その上部に3個の受信子を取り付け、各送信子の間となる位置(2つの送信子との角度が 30° となる位置)の下部に2個の受信子を取り付けた。そして、径16mmのアクリル円柱を検出対象物として、超音波の送受信を行った。この際、送受信波形のS/N比の向上を目的として、チャープ波を用いたパルス圧縮法も試みた。パルス圧縮法は、水中や生体超音波の送受信測定において広く用いられているが、空中超音波においては周波数変調可能な広帯域の超音波プローブが実用化されていないため、その適用が困難であった。しかし、ECSは50~200kHz付近において広帯域な周波数特性を有するために、パルス圧縮法が有効ではないかと考えた。

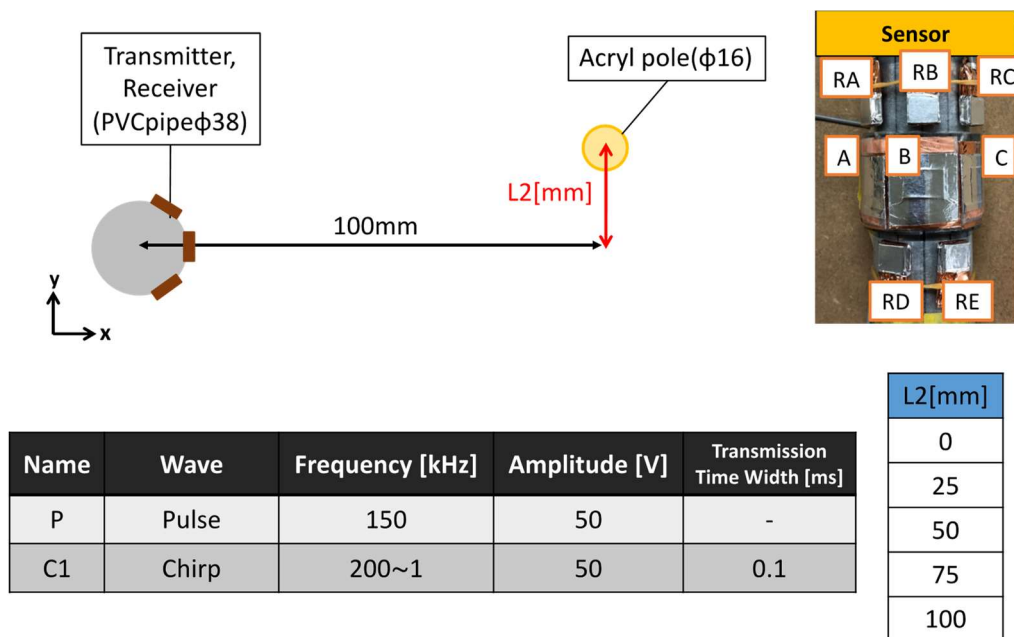


図4. 送信子を分割した円筒形状のECSアレイの概念図と検出対象物との位置関係

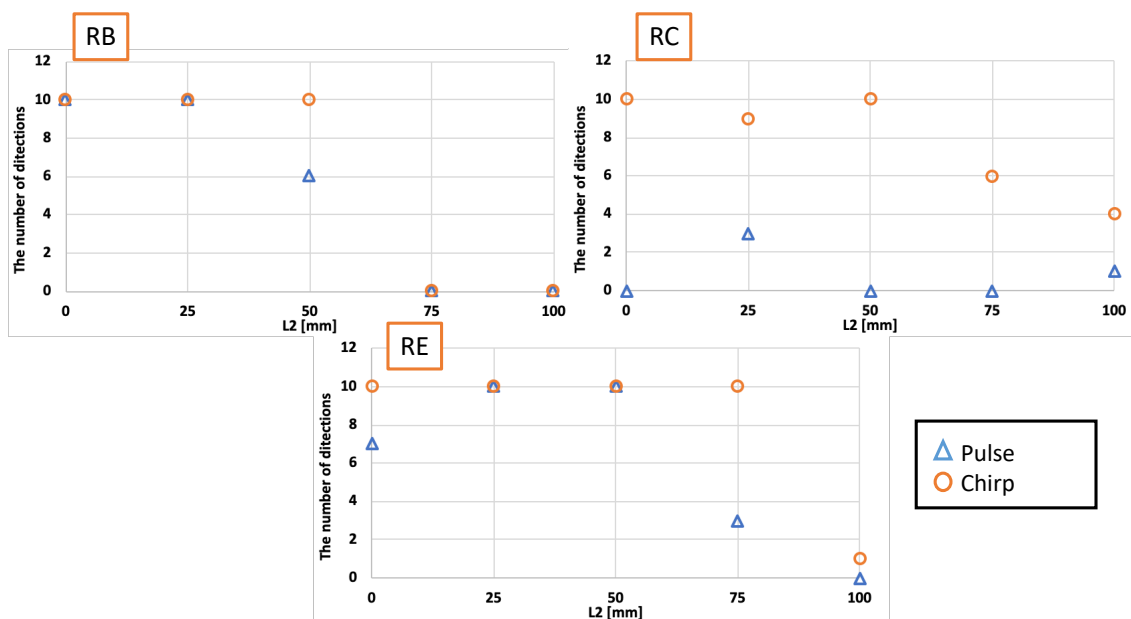


図5. パルス波およびチャープ波を用いた超音波送受信測定による物体位置検出率の比較
RB, RC, REはそれぞれ送信子上部に設置した受信子による送受信結果を示す。

チャープ波は 200-1 kHz のダウンチャープ波（時間幅 0.1 ms, 両振幅 50 V）を用い、比較のため 150 kHz のバースト波（波数 1, 両振幅 50 V）をパルス波として用いた。いずれも、正面に検出対象物を置いてえられた送受信波形をリファレンス波形としてパルス圧縮を行った。いずれの場合も 1 つの物体位置について 10 回測定を行い、S/N 比 6 dB 以上の信号波形が得られた場合、物体を検出したと判定した。図 5 にパルス波およびチャープ波を用いた超音波送受信測定による物体位置検出結果を示す。いずれの受信子においてもチャープ波を用いることで、物体検出率が大きく向上していることが明らかとなった。

これらの結果から、フレキシブル ECS を用いることで全方位の物体検出が可能だけでなく、ECS の広帯域周波数特性を利用することでパルス圧縮法を用いた空中超音波の送受信感度の大幅な向上が期待できることがわかった。今回製作した ECS アレイはスプレー塗布により得られたシリカ凝集体によりマイクロギャップを形成しているため、各素子の周波数特性にばらつきがある。しかし、レーザー照射によるパターニングで均一なマイクロギャップを形成した ECS アレイを製作すれば、各素子の周波数特性のばらつきを低減できるため、さらに空中超音波の送受信感度が増加するため、空中超音波を用いたセンシング技術の画期的な向上につながるのではないかと期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

Performance Evaluation of Flexible Electret Sensor Array for Ultrasonic Object Detection in Short Distance, Kageyama, K., Okawa, T. and Sakai, T., *Proceedings of IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp.790-791 (2018).

〔学会発表〕（計 1 件）

Performance Evaluation of Flexible Electret Sensor Array for Ultrasonic Object Detection in Short Distance, Kageyama, K., 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (2018)

〔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〕

ホームページ等

<http://mehp.mech.saitama-u.ac.jp/activities/kageyama-2.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8 桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：