

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04655

研究課題名(和文) 超フレキシブル有機圧電型発電/拍動検知デバイス開発と生体内駆動の検証

研究課題名(英文) Development of ultra-flexible organic piezoelectric power generation/pulse detection device in vivo drive

研究代表者

石田 謙司(ishida, kenji)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：20303860

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,300,000円

研究成果の概要(和文)：フレキシブル有機圧電センサーを用いて、心臓拍動センシングと心臓発電に関する基礎研究を行った。3D心臓モデルの収縮/拡張という物理的な動きの直接信号化、心臓の筋力指標となりうる心筋力検知、疑似生体内環境下での動作確認などを検証した。加えて生体適合素材ある気相重合パリレンCにて全面被覆した有機圧電素子を試作し、マウスを用いた動物実験に取り組んだ。マウス心臓の収縮時に負、弛緩時に正の圧電電圧出力が得られ、かつマウス心臓の心拍数にほぼ一致した圧電出力波形が得られた。マウス心臓拍動由来の電力算出を行った所、約0.1pWオーダーのエネルギー創出が観測され、生体内発電の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体内に埋め込み、係留した医療用センサーによって病情報を取得したり、薬剤を自動投薬する医療機器の研究開発が急速に進んでいる。これら機器は"インプラントデバイス"と呼ばれ、生体機能の一部をサポートし、患者の病状回復や病態管理する次世代医療工学技術として注目されている。これら生体内センサー/医療機器には幾つかの技術的課題が存在するが、重要課題の1つが生体内での電源確保である。本研究では当該問題の解決のため、超柔軟で毒性のない有機圧電体膜を、体内で常時動いている心臓に係留し、心臓拍動による生体内型発電と心臓心拍モニタリングに取り組み、マウスを用いた動物実験を通してその可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We conducted basic research on heart beat sensing and cardiac power generation using flexible organic piezoelectric sensors, verifying direct signalization of physical movement (contraction/expansion) of a 3D heart model, stress detection as a potential indicator of cardiac muscle strength, and operation under a simulated in vivo environment. In addition, we fabricated a prototype organic piezoelectric device coated entirely with vapor-phase polymerized parylene C, a biocompatible material, and conducted animal experiments using mice. The piezoelectric voltage output was negative during contraction and positive during relaxation of the mouse heart, and the piezoelectric output waveform was almost identical to the heart rate of the mouse heart. The calculation of the power derived from the pulsation of the mouse heart showed that energy generation on the order of about 0.1 pW was observed, indicating the possibility of in vivo power generation.

研究分野：応用物理

キーワード：心臓拍動 有機圧電薄膜 生体適合性 インプラントデバイス

【1. 研究開始当初の背景】

生体内に埋め込み、係留した医療用センサーによって病理情報を取得したり、自動的に薬剤を投与する医療機器の研究開発が急速に進んでいる。これら機器は「インプラント(生体内)デバイス」と呼ばれ、生体機能の一部をサポートし、患者の病状回復や病態管理、QOLを向上させる次世代医療工学技術として注目されている。体内に埋め込む行為に抵抗感が伴う場合もあるが、現状でも心臓ペースメーカを代表例として、米国食品医薬品局(FDA)承認されたデジタルメディスン、経腸療法(小腸に係留した小型投薬機により体内薬濃度を一定化)、スマートコンタクトレンズ、疼痛管理デバイスなどの運用が始まっている。日本では、アルツハイマー病に次いで2番目に多い神経変性疾患であるパーキンソン病に対して脳に電極を埋め込み電気刺激を与えることで身体の震え、運動障害を抑制して患者QOLをあげる「脳深部刺激療法」が最近承認された。このようにインプラント医療デバイスは、もはや遠い未来の技術ではなく、海外研究に遅れることなく、日本においても積極的に研究開発を進めるべき研究領域である。

これら開発途上にある生体内センサー/医療機器には幾つかの技術的課題が存在するが、重要課題の1つが生体内での電源確保の問題である。皮膚貫通した電源コード配線は感染症や医療事故の元となり、大容量バッテリーでは硬く大きな電池の体内係留や電池交換のための再手術が大きな身体負担となる。また電磁場の生体組織への侵入長は短く、体内深部への非接触充電には課題が多い。一方、先端的なIoT/医療センサーや無線通信器の消費電力が年々減少していることを踏まえると、発電量は小さくても、生体内で安全に、かつ継続的に発電する生体内電源が実現すれば革新的かつ有用である。

持続可能エネルギーの創出に向けては「エナジーハーベスト」技術が注目されている。本研究で注目した圧電型微小発電技術は、環境中における変形や振動現象から電力創出する技術である。その研究対象として無機酸化物圧電材料ジルコン酸チタン酸鉛(PZT)が多く利用されているが、PZTは有毒な鉛を含むため生体内組織への係留は医学的な障害が大きい。またPZTの様な無機圧電セラミックはその機械特性から(1)大変形による脆性破壊、(2)生体組織の膨張変形に応答困難、(3)筋肉や臓器の動きや機能を阻害する可能性、などの不具合をもち、生体組織の弱い力でゆっくりとした、大きな組織変形を電気エネルギーに変換するには大きな困難が伴うため、生体内で駆動する圧電素材としては素材にまで立ち戻った研究開発が必要となると考えた。

【2. 研究の目的】

上記背景を鑑み、本課題における研究目的を「超フレキシブルな圧電型発電/拍動検知フィルムの生体内駆動検証」と設定した。生体内で常時、変形が生じる臓器として「心臓」に注目し、心臓拍動による生体内発電をモデル研究として設定した。その実現に必要なポテンシャル素材としては有機強誘電体薄膜を選択し、そのナノ構造制御を通じて柔軟性と圧電性を兼ね備えたデバイス素材となるよう研究開発を進めた。心臓拍動シミュレータの心臓モデルの複数箇所に開発デバイスフィルムを係留し、心臓モデルの拍動パターンに対する圧電信号を検出・解析した。加えて、ハイドロゲルを用いて構築した疑似生体内環境下において、超フレキシブル有機圧電フィルム素子の生体内発電/拍動検知システムとしての実現可能性を追求することを目的とした。

【3. 研究の方法】

(1) 有機強誘電体の薄膜化及びデバイス作製

有機強誘電体としてP(VDF-TrFE)(Fig. 1(a))を用いて、P(VDF-TrFE)溶液を調製した。基板としては、ポリエチレンナフタレート(PENフィルム, 2 μ m)、および生体適合性ポリモノクロロパラキシリレン(パリレンC)を選択した。

各フィルム基板上にAl電極を形成し、その直上にP(VDF-TrFE)溶液をスピンコート法により展開してP(VDF-TrFE)薄膜を作製した。窒素雰囲気下で熱アニール処理することで結晶化度を向上させると共に強誘電性I型結晶への結晶相制御を行った。その後、上部Al電極を成膜し、Fig. 1(b)のようなキャパシタ型有機圧電素子とした。

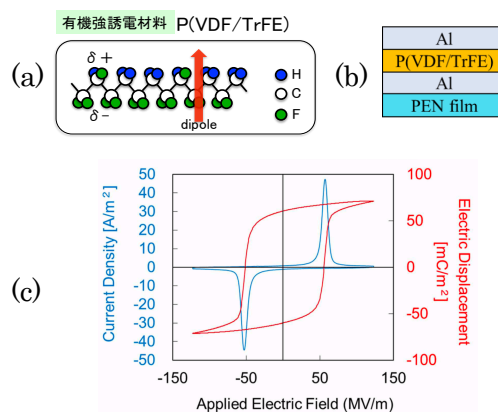


Fig. 1 (a)P(VDF/TrFE)分子構造, (b)キャパシタ型有機圧電素子の構造, (c)典型的な誘電ヒステリシス

作製した有機圧電素子には、任意振幅の三角波電圧を印可し、電流密度-印加電界(J-E)スイッチング曲線及び電気変位量-印加電界(D-E)ヒステリシス曲線を測定し、抗電界(E_c)と残留分極量(P_r)を求めた。典型的な測定結果を Fig. 1(c)に示す。観測された E_c は 50 MV/m、 P_r は 60 mC/m² 程度であり P(VDF/TrFE)の典型的な物性値を示した。素子性能を統一するため、試作する有機圧電素子の P_r は 60 mC/m² とした。

(3-2) パリレン C 気相重合プロセスと素子封止

パリレン C 膜は、ジクロロ-(2,2)-パラシクロファン (パリレン C ダイマー) の気相重合により形成した。10 Pa 程度の真空中において原料粉末 (ダイマー) を約 150°C で気化し、高温化した石英管に通すことで C-C 結合を切断してパラキシリレン・モノマーへと熱分解・ラジカル化する。そのモノマーガスを真空チャンバへ誘導して、気相重合することでポリマー膜を得た (Fig. 2(a))。パリレン C 膜は、成膜時に溶剤、触媒、可塑剤などの液相媒体を必要せず、気相重合が室温で行われるため基材の温度上昇を抑えられ、電子機器、医療用部品などのコーティング剤として広く応用されている。本研究では基板材としてだけでなく、生体内環境にて体液浸食による素子破壊を抑制するための被覆剤としても用いた。原材料ダイマー及び気相重合膜のフーリエ変換赤外分光測定 (FTIR) スペクトルを比較し、パリレン C の形成を確認した。また FTIR 透過法と高感度反射法 (RAS) にて観測された IR スペクトルでは、パリレン C 由来の吸収ピーク強度差が存在しており、そのスペクトル解析から、パリレン C 膜は分子内に存在するベンゼン環を基板に対して垂直方向に向け、かつ分子鎖が基板面内に延びた配向構造を持つことが示差された。Fig. 2(b)には、原子間力顕微鏡 (AFM) 観測により得られたパリレン C 気相重合膜 (膜厚: 1.6 μm) の表面形状像を示すが、平均二乗粗さ約 4nm 程度のピンホールなく非常に平坦な高分子重合膜が得られたことから、表面粗さの変化に弱い有機圧電素子の基板材として適用可能と判断した。

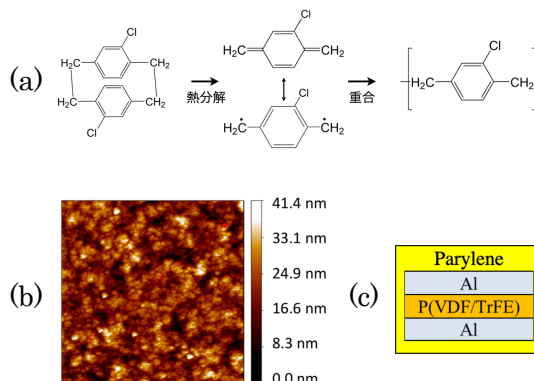


Fig. 2. (a) パリレン C の気相重合反応. (b) AFM 表面像, (c) パリレン C 被覆した素子構造

【4. 研究成果】

4.1 3D 心臓モデルを用いた心拍センシング

本研究では、動物実験を行う前の基礎研究として、心臓手術シミュレータとして開発された心臓拍動モデルを用いて実験を行った。3D 心臓モデルは、成人男性心臓の 3D-X 線 CT 画像から内部構造や心筋厚を含めて忠実に形成されており、心臓の拍動パターンを再現している。この 3D 心臓モデルの表面にフレキシブル有機圧電センサーを k 係留した。有機圧電センサーは、その柔軟性から心臓モデル曲面に沿って固定され、心臓モデルの複雑な拍動挙動に対しても同様な変形を繰り返し、拍動運動により剥がれ落ちることはなかった。更には、生体内環境を模倣するため、生理食塩水濃度で作成した PVA ハイドロゲルを有機圧電センサー上に貼り付け、疑似生体内環境下での動作について確認を行った。

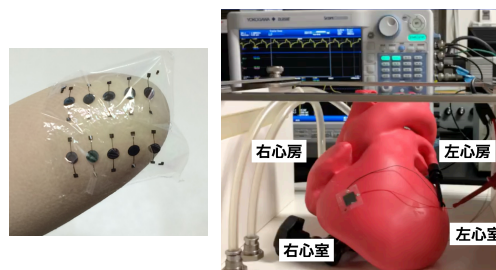


Fig.3 フレキシブル有機圧電センサと心臓拍動シミュレータ外観

Figure 4 には、心臓モデル上で同一素子の分極方向を Up poling と Down poling にそれぞれ揃えた際の実出力電圧波形 (60bpm) を示す。Up poling 素子では 3D 心臓モデルの収縮時に正電圧が、膨張時に負電圧が出力された。Down poling 素子では、ほぼ対照的な出力電圧波形が得られた。同じ変形挙動に対して逆極性の出力電圧が得られたことから、観測された出力電圧波形は、有機強誘電体の正圧電効果に由来する電気的出力であることを確認した。

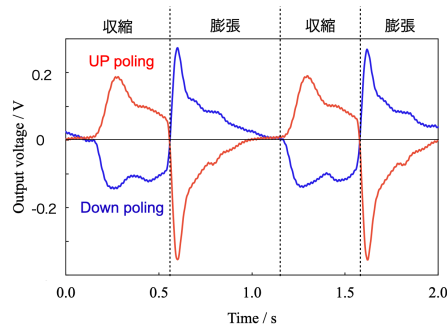


Fig.4. Up/Down ポーリングした有機圧電素子の拍動応答特性

Figure 5 には、心臓拍動システムを 60bpm で動作させた際に観測される有機圧電出力パターンと典型的な心電図データを示す。両データを比較すると、最初

の正電圧立ち上がり挙動は概ね一致しているが、後半の負電圧変化は有機圧電データでは観測されるものの、心電図では観測が難しい。この両者データの不一致は、測定原理の違いにあると考えた。心臓は、洞結節から発生された電気刺激が心臓内の刺激伝達系を伝わり、心房から心室へと順番に心筋収縮を促す。心電図では、この電氣的刺激を体外から電気信号として測定し波形化する。心電図データにおける、最初のP波は心房収縮を、QRS波からなる大きな山は心室収縮を、T波は心室が興奮から回復する過程を示している。つまり心電図データは心臓動きそのものを計測しているのではなく、洞結節から心臓部位を伝播していく電氣的刺激を計測している。一方、有機圧電素子は心臓表面の物理的な変形を直接観測しており、そこには測定原理の大きな違いがある。それ故、心電図では電氣的刺激が弱まる心臓の拡張期(心筋が興奮からさめ、弛緩していく様子)を観測しにくいのに対して、有機圧電素子は心臓の変形そのものを信号化するため、収縮/膨張の両過程を正確にデータ化することができる。これらのことを踏まえると、心電図では計測しがたい、心筋異常によって引き起こされる心膜炎、心筋衰弱、血管閉塞、更には心臓組織の部分壊死等の心臓疾患等における早期発見が期待され、有機圧電膜の特徴を出せる可能性がある。

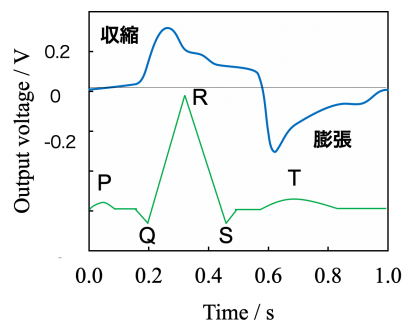


Fig. 5 有機圧電フィルム出力(青)と心電図データ(緑)との比較

4.2 心臓拍動の応力センシング(心筋機能の定量化)

未延伸 P(VDF/TrFE)薄膜では面内の圧電性が等方的 ($d_{31}=d_{32}$) と仮定すると、圧電出力値から圧電薄膜に印加された応力が計算できる。Fig. 6 には、実測した圧電電圧値から換算した圧電薄膜に印加された圧縮応力の時間変化を示す。心臓では、心筋の弛緩状態(拡張期)を始点として、神経刺激によって心筋収縮が生じると考えて、心臓のが膨張状態を応力ゼロと定義した。また面内に圧縮応力が働く方向を負とした。

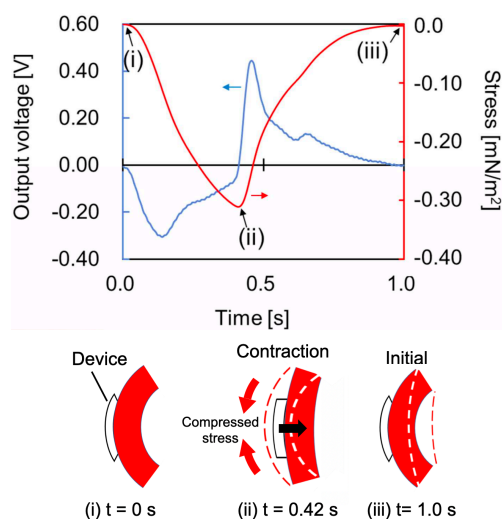


Fig.6 心臓拍動時に有機圧電フィルムに印加される応力の時間変化

3D 心臓モデルの収縮に伴って、有機圧電フィルムからは負電圧が出力され、収縮→拡張への切替タイミングで出力電圧の極性反転が観測された。それぞれの状態を詳細に考察すると、(i) $t = 0$ sにおける3D心臓モデル状態は、心臓拍動における弛緩状態(拡張期)を表す膨張状態である。 $t = 0 \sim 0.5$ sにおいて、3D心臓モデルは収縮運動を起こし、圧電フィルムには圧縮方向の応力が印加される。(ii) $t = 0.5$ にて、心臓モデルは最大収縮し、その時にデバイスに印加されていた応力は $-3.11 \times 10^{-4} \text{ mN/m}^2$ と算出された。 $t = 0.5 \sim 1.0$ sに3D心臓モデルは収縮から膨張へ転じ、圧電電圧は負極性から正極性へ変化する。圧電フィルムに印加されていた圧縮応力は徐々に減少していく。(iii) $t = 1.0$ sにおいて、3D心臓モデルは最大膨張状態、つまり(i) $t = 0$ sと同じ初期状態に戻る(印加応力は0に戻る)。心電図データとは異なり、有機圧電フィルムは3D心臓モデルの変形挙動そのものをセンシングしていると考え、計測される電圧信号は3D心臓モデルの変形量(実際の心臓においては心筋の筋力)を表している。若者と高齢者、心疾患の有無によって心臓の動き方(力強さ)は異なると考えられ、心筋機能の新たな指標にもなりうる可能性をもつ。現状、心臓の筋力や活動量を計測する手法は殆どなく、心電図データでは計測の難しい心筋疾患の早期発見や、拍動データをビックデータ解析することで得られる疾患予測や生活改善の提案など、興味深いアプローチができる可能性を秘めている。

4.3 3×3アレイ素子による心臓拍動の2次元解析

より詳細な拍動状態の解析に向けて、フレキシブル基板上に有機圧電センサを複数搭載したアレイ素子を形成し、心臓拍動の多点測定に取り組んだ。10 mm×10 mmのフィルム基板上に3×3の合計9つの圧電素子を形成した。9つの圧電センサーからは、各素子の設置場所における収縮応力が観測され、それらデータを2次元マップすることで、心臓の拍動運動における応力分布の時間変化を解析することができる。Fig.7には、心臓モデル右心室が最も収縮した時間に、計測

された圧電信号から解析した収縮応力の2次元分布を示す（寒色ほど応力小、暖色ほど応力大）。心臓モデルの収縮時、素子7付近で収縮応力が小さく、素子6付近で大きいことが示された。心臓は血液を絞り出す心室部の心筋が発達しており、その収縮応力が大きいと予想される。この様に、心臓の収縮/拡張時の応力分布及びその時間依存性を観察できることを示し、心筋の部分壊死や伝達異常など従来では発見しがたい病変を発見できる可能性を示した。

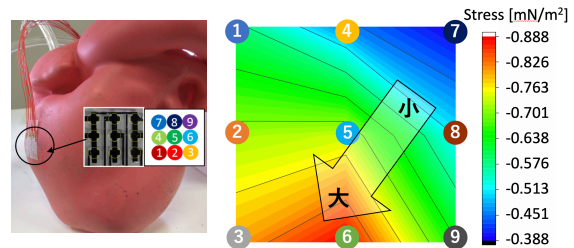


Fig. 7 3×3 アレイ素子にて観測された 3D 心臓モデル収縮時の応力 2 次元分布

4.4 心臓拍動による圧電型振動発電

一般的な圧電型振動発電において、最大出力電力 P_{max} は最適抵抗 R 、出力電圧 V を用いて $P = V^2/R$ の式で計算される。しかし共振周波数付近で振動励起されるモデル素子とは異なり、3D 心臓モデルの拍動は複雑かつ非共振的な動きを示すため、本研究では、圧電出力の時間依存性カーブを心臓拍動 1 回分の時間 ($t_1 \sim t_2$) で積分して、その出力エネルギー（発電量） J を求めた。Fig.8 には、心臓モデルの拍動（60bpm）にて観測された単位面積当たりの圧電発電エネルギーの負荷抵抗依存性を示す。圧電センサー素子と並列挿入した負荷抵抗を変化させながら出力電力を観測したところ、負荷抵抗 $8M\Omega$ 程度において、発電電力は $0.267 [nJ/mm^2]$ であった。圧電型振動発電エネルギーは、有機圧電薄膜の膜厚、積層数、 P_r 値、インピーダンスマッチングなどに依存することから、これらを最適化することで、これまでに $3.6\mu J/min$ を達成した。

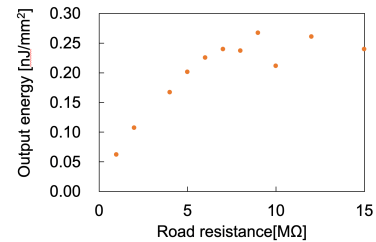


Fig. 8 圧電型発電エネルギーの負荷抵抗依存性

4.5 疑似生体内環境下での心臓拍動観測

心臓は生体内においてリンパ液を始めとする体液に満たされた湿潤環境下で拍動しており、有機圧電素子は周囲に水分を多く含む環境下で長時間動作できる必要がある。本研究では、疑似生体内環境における耐久性試験を実施するため、Fig.9 のように生理食塩水にて作成した PVA ハイドロゲルで有機圧電センサーを覆い、その動作検証を行った。パリレン封止なしの有機圧電センサーからの圧電出力は直ちに劣化するのにに対し、パリレン C（膜厚： $0.8 \mu m$ ）で封止した有機圧電素子では長時間継続してセンサ出力が観測された。この様にパリレン C によるセンサー封止は、生体適合性だけでなく、生体環境下におけるセンサー動作の観点からも有効であることが示された。

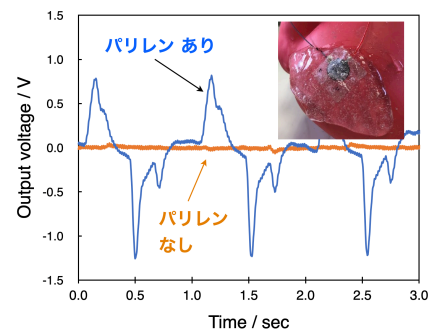


Fig. 9 疑似生体内環境下での有機圧電センサーの動作状況

4.6 マウスを用いた動物実験

生体適合素材ある気相重合パリレン C にて全面被覆したフレキシブル有機圧電素子を試作し、マウスを用いた動物実験に取り組んだ。マウス心臓の曲面形状に沿うように有効電極構造を工夫した。試作した有機圧電デバイスをマウス心臓の右心房表面に装着し、拍動測定を試みた。マウス心臓の収縮時に負、弛緩時に正の圧電電圧出力が得られた。動物実験時に録画した動画観察よりマウス心臓の心拍数は約 100bpm であったのに対して、出力波形から読み取った心拍数は約 120bpm となり、マウスの心臓拍動にほぼ一致した圧電出力波形が得られたことを確認した。出力電圧の 2 乗値を 1 拍動分で積分することで心臓拍動由来の電力算出を行った所、出力電力として約 $0.1pW$ オーダーのエネルギー創出が観測され、生体内発電の可能性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yohei Sutani, Yasuko Koshiba, Tatsuya Fukushima, Kenji Ishida	4. 巻 vol. 228
2. 論文標題 Formation mechanism of ferroelectric poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymers with in-plane dipole alignment under low electric field from melt and its SPR based pyroelectric sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 123904-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2021.123904	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 Horike, Qingshuo Wei, Kazuhiro Kirihara, Masakazu Mukaida, Yasuko Koshiba, Kenji Ishida	4. 巻 vol. 9
2. 論文標題 Anomalous n-type conversion of thermoelectric polarity in ionic hydrogels using PEDOT:PSS electrodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 15813-15819
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1tc01385h	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 Yusaku Nagayama, Yuya Kondo, Yasuko Koshiba, Shohei Horike, Kazuto Takashima, Kenji Ishida	4. 巻 Vol. 61
2. 論文標題 Multipoint detection of structural deformation of pulsating 3D heart model using flexible organic piezoelectric-sensor array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SE1014-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5a04	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 石田謙司, 山田萌菜美, 小柴康子, 福島達也	4. 巻 Vol. 32, No. 2
2. 論文標題 ジバラキシリレンの真空中での蒸発挙動に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会誌:M&BE	6. 最初と最後の頁 pp.78-83
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 無
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 Keigo Shikata, Yasuko Koshiba, Shohei Horike, and Kenji Ishida	4. 巻 Vol.202, No.14
2. 論文標題 P(VDF/TrFE) Thin Film Piezoelectric Actuators Sealed Parylene C for Medical Micropumps	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 2300250-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.202300250	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 小柴康子, 堀家匠平, 石田謙司	4. 巻 Vol.202, No.14
2. 論文標題 Fabrication and Local Electrical Characterization of p-n Junction Copper Phthalocyanine Nanorods	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 2300243-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.202300243	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 石田謙司	4. 巻 石田謙司
2. 論文標題 フレキシブル有機圧電センサによる心臓拍動検出と心臓発電	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 408-411
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 Mayuko Nishinaka, Ikuyo Harada, Kouki Akaike, Qingshuo Wei, Yasuko Koshiba, Shohei Horike, Kenji Ishida	4. 巻 vol.218
2. 論文標題 Electrochemical charge-carrier modulation of carbon nanotubes using ionic liquids derived from organic superbases for stable thermoelectric materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 Carbon
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2023.118667	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 Yoshiaki Hattori, Hayato Takahashi, Naoki Ikematsu, Masatoshi Kitamura	4. 巻 125(25)
2. 論文標題 Chain-length dependence of optical properties for an alkanethiol monolayer on an ultrathin gold film revealed via reflected light microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 pp.14991-14999
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c03080	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 Yoshiaki Hattori, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Masatoshi Kitamura	4. 巻 33(6)065702
2. 論文標題 Visualization of a hexagonal boron nitride monolayer on an ultra-thin gold film via reflected light microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanotechnology	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) 10.1088/1361-6528/ac3357	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 Satoshi Inoue, Yoshiaki Hattori, Masatoshi Kitamura	4. 巻 61 (SE) SE1012
2. 論文標題 Organic monolayers modified by vacuum ultraviolet irradiation for solution-processed organic thin-film transistors	5. 発行年 2022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/ac4b92	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 Yoshiaki Hattori, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Masatoshi Kitamura	4. 巻 15 (8) 086502
2. 論文標題 Enhancement of the contrast for a hexagonal boron nitride monolayer placed on a silicon nitride/silicon substrate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac8270	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 Hattori Yoshiaki, Kitamura Masatoshi	4. 巻 764
2. 論文標題 Reflected light microscopy of a gold oxide layer formed on a Au film by ultraviolet/ozone treatment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 139631 ~ 139631
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2022.139631	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 Hattori Yoshiaki, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Kitamura Masatoshi	4. 巻 34
2. 論文標題 Identification of the monolayer thickness difference in a mechanically exfoliated thick flake of hexagonal boron nitride and graphite for van der Waals heterostructures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 295701 ~ 295701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/accf23	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 Hattori Yoshiaki, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Kitamura Masatoshi	4. 巻 6
2. 論文標題 Antireflection Substrates for Determining the Number of Layers of Few-Layer Hexagonal Boron Nitride Films and for Visualizing Organic Monolayers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 21876 ~ 21886
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.3c04075	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 Kitano Yudai, Hattori Yoshiaki, Kitamura Masatoshi	4. 巻 63
2. 論文標題 Surface properties of an InGaZnO ₄ layer with a monolayer formed using a phosphonic acid: wettability, work function, and thermal stability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 01SP32 ~ 01SP32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acfef9	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 Takashima Kazuto, Watanabe Masahiro, Inoue Kai, Horie Satoshi, Ishida Kenji	4. 巻 1
2. 論文標題 Fabrication and Evaluation of Catheter-Type Tactile Sensor Composed of Two Polyvinylidene Fluoride Films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SICE Annual Conference 2022	6. 最初と最後の頁 pp.1165-1170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/SICE56594.2022.9905774	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 Yamagishi Mizuho, Horike Shohei, Koshiba Yasuko, Mori Atsunori, Ishida Kenji	4. 巻 8
2. 論文標題 Broadband absorption and light-energy transfer in a phenyl-core thiophene dendrimer with multiple -conjugations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Molecular Systems Design & Engineering	6. 最初と最後の頁 189 ~ 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2me00157h	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 Uneda Kohki, Horike Shohei, Koshiba Yasuko, Ishida Kenji	4. 巻 249
2. 論文標題 Dipole switching dynamics in P(VDF-TrFE) film revealed by in-situ polarization switching and infrared spectroscopy measurements with high-time resolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 124822 ~ 124822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2022.124822	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 Takahashi Daiki, Horike Shohei, Koshiba Yasuko, Ishida Kenji	4. 巻 61
2. 論文標題 Normal alkane evaporation under vacuum: chain-length dependency and distillation from binary systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 086507 ~ 086507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac7623	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 Matsumoto Takuya, Kashimoto Masaki, Kubota Chihiro, Horike Shohei, Ishida Kenji, Mori Atsunori, Nishino Takashi	4. 巻 13
2. 論文標題 Mechanical properties and structures under the deformation of thiophene copolymers with cyclic siloxane units	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymer Chemistry	6. 最初と最後の頁 5536 ~ 5544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2py00765g	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 Kawasaki Kaho, Harada Ikuyo, Akaike Kouki, Wei Qingshuo, Koshiya Yasuko, Horike Shohei, Ishida Kenji	4. 巻 5
2. 論文標題 Complex chemistry of carbon nanotubes toward efficient and stable p-type doping	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Communications Materials	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) 10.1038/s43246-024-00460-0	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35件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 石田謙司・堀家匠平・小柴康子
2. 発表標題 フレキシブル有機圧電薄膜を用いた心臓拍動検知 / 発電デバイス創出
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 電子情報通信学会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 啓寛, 高嶋 一登, 堀江 聡, 石田 謙司
2. 発表標題 PVDFフィルムを用いたカテーテル型触覚センサの周波数特性の評価
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田謙司
2. 発表標題 分極制御したフレキシブル有機強誘電体薄膜のセンサー・創エネ機能
3. 学会等名 日本学術振興会 将来加工技術第136委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田謙司
2. 発表標題 有機・高分子材料を用いた環境発電
3. 学会等名 第52回中部化学関係学協会支部連合秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusaku Nagayama, Yuya Kondo, Yasuko Koshiba, Shohei Horike, Kenji Ishida
2. 発表標題 Multipoint detection of the displacement from heartbeat using flexible organic piezoelectric sensor array
3. 学会等名 International Conference on Flexible and Printed Electronics (ICFPE)2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田謙司, 山田萌菜美, 小柴康子, 福島達也
2. 発表標題 ジバラキシリレンの真空中での蒸発挙動に関する研究
3. 学会等名 応用物理学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会「時代を切り拓く有機分子・バイオエレクトロニクス研究」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中雅人, 小柴康子, 堀家匠平, 石田謙司
2. 発表標題 生体模倣ゴムに包埋した有機圧電薄膜デバイスの多軸応力解析
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 畦田晃希, 堀家匠平, 小柴康子, 石田謙司
2. 発表標題 高速時間分解FT-IR / 強誘電特性の同時測定による P(VDF-TrFE) 薄膜の分極反転ダイナミクス評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋大樹, 堀家匠平, 小柴康子, 石田謙司
2. 発表標題 真空下熱重量測定による鎖状アルカン蒸発挙動の鎖長依存性評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 船木康伸, 小柴康子, 堀家匠平, 石田謙司
2. 発表標題 一軸延伸した強誘電性高分子薄膜の分子配向と焦電特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紫加田京瑚, 堀家匠平, 小柴康子, 石田謙司
2. 発表標題 医療機器用コーティングしたP(VDF/TrFE)薄膜のアクチュエーション機能
3. 学会等名 第69回高分子研究発表会(神戸)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅咲来, 堀家匠平, 小柴康子, 石田謙司
2. 発表標題 両親媒性溶媒を用いたポリフッ化ピニリデンのスピコート薄膜の構造変化に関する研究
3. 学会等名 第69回高分子研究発表会(神戸)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasuko Koshiba, Satoshi Atsumi, Shohei Horike, and Kenji Ishida
2. 発表標題 In situ observation of polyurea synthesis using fast time resolved infrared spectroscopy
3. 学会等名 KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics 2023 (KJF-ICOMEF 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久保 佑一郎, 堀家匠平, 小柴康子, 石田謙司
2. 発表標題 リンクル構造を導入した有機薄膜圧電センサの作製と評価
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 紫加田京瑚, 堀家匠平, 小柴康子, 石田謙司
2. 発表標題 積層した円型 P(VDF/TrFE)薄膜素子の逆圧電特性評価
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長野 聡一朗, 高嶋 一登, 竹中 慎, 石田 謙司
2. 発表標題 PVDFフィルムを用いたカテーテル型触覚センサの特性評価
3. 学会等名 機械学会第34回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Inoue, Yoshiaki Hattori, Masatoshi Kitamura
2. 発表標題 Organic monolayers modified by ultraviolet-ozone for solutionprocessed organic thin-film transistors
3. 学会等名 11th International Conference on Flexible and Printed Electronics
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 服部 吉晃, 北村 雅季
3. 学会等名 膜材料デバイス研究会 第18回研究集会「結晶成長技術とデバイスの新展開」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 吉晃, 谷口 尚, 渡邊 賢司, 北村 雅季
2. 発表標題 金極薄膜を用いた単層h-BNの可視化
3. 学会等名 第69応用物理学関係連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 悠太, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 大気中光電子収量分光法によるInGaZnO薄膜のエネルギーバンド構造解析
3. 学会等名 第69応用物理学関係連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 聡, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 塗布型有機薄膜トランジスタのためのUV/オゾン処理有機単分子膜の改質
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 悠太, 中野渡 俊喜, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 大気中光電子収量分光法による原子比率の異なるInGaZnO 薄膜の仕事関数評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野渡 俊喜, 渡邊 悠太, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 In5GaZn010薄膜トランジスタの特性評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 悠太, 中野渡 俊喜, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 光電子収量分光法によるInGaZnO 薄膜のバンド構造解析
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会第19回研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野渡 俊喜, 渡邊 悠太, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 In5GaZn010 薄膜をチャネル層とする電界効果トランジスタの特性評価
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会第19回研究集会,
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部 吉晃, 谷口 尚, 渡邊 賢司, 北村 雅季
2. 発表標題 層状物質の厚い膜に存在する単層分の厚さの違いを検知する手法
3. 学会等名 第70回応用物理学関係連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 津田 真太郎, 服部 吉晃, 井上 聡, 北村 雅季
2. 発表標題 有機薄膜形成のためのインクジェット法による親水疎水パターンニングを用いた液滴挙動制御
3. 学会等名 第70応用物理学関係連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中野渡 俊喜, 渡邊 悠太, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 スパッタリングにより作製したIn5GaZn010薄膜トランジスタの特性評価
3. 学会等名 第70応用物理学関係連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷垣 賢, 村田 大樹, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 フォトマスクを用いた酸化金のパターンニング形成
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会第20回研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉岡 賢司, 一楽 想大, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 光電子収量分光法によるIn7GaZn013薄膜の仕事関数測定
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会第20回研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 一楽 想大, 吉岡 賢司, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 二層構造InGaZnO4/In5GaZnO10から成る薄膜トランジスタの特性評価
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会第20回研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村田 大樹, 谷垣 賢, 服部 吉晃, 北村 雅季
2. 発表標題 光学顕微鏡を用いたチオール有機単分子膜のパターニング評価
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会第20回研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊 啓寛, 高嶋 一登, 堀江 聡, 石田 謙司
2. 発表標題 カテーテル型触覚センサに用いるPVDFフィルム形状の影響
3. 学会等名 日本機械学会第33回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高嶋 一登
2. 発表標題 血管内の力学的特性を計測する技術開発へ向けて
3. 学会等名 第87回日本循環器学会学術集会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石田謙司
2. 発表標題 フレキシブルな有機圧電フィルムを用いた心臓拍動検知と心臓発電
3. 学会等名 高分子学会,23-2印刷・情報・電子用材料研究会(招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 石田謙司, 堀家匠平	4. 発行年 2021年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 528
3. 書名 環境発電ハンドブック第3編 環境発電の材料-IoT時代に向けて- 第1章 振動発電, 3. 圧電ポリマーの分子配向と多層膜化の効果	

〔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	北村 雅季 (kitamura masaki) (10345142)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	
研究分担者	高嶋 一登 (takashima kazuto) (30435656)	九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授 (17104)	
研究分担者	堀家 匠平 (horike shouhei) (00809486)	神戸大学・工学研究科・助教 (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	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	小柴 康子 (yasuko koshiba) (70243326)	神戸大学・工学研究科・助手 (14501)	

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