

令和 元年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04527

研究課題名(和文)革新的3Dトリリオンセンサ作製技術の開発

研究課題名(英文)Innovative 3D trillion sensor

研究代表者

寺崎 正 (TERASAKI, Nao)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ長

研究者番号：00399510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：『ナノ・マイクロ機能材料の3D印刷』を基に、下記2課題の革新的トリリオンセンサ作製技術開発を行った。【課題1】3D印刷による配線技術に向け、3次元器物への細線印刷、伝導性確保、めっき品質低下予兆の可視化、印刷可能なセンサプローブ開発に成功した。【課題2】CAE設計高度化に向けた、3D応力可視化センシング手法を確立した。応力発光センサを3次元敷設した3D器物を作製し、構造や荷重印可に応じた応力発光画像を取得する事に成功した。実構造物設計図よりのシミュレーションに対して、応力発光情報が精度向上に有効と実証した。知見は「3D器物×応力発光＝rapid simulator」として橋渡を開始した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CAE・シミュレーションを駆使したモデルベース設計、寿命予測などのCPSデジタルエンジニアリングが世界的に注目される中、本課題開発3次元センサにより取得した実空間情報を活用し、CAE情報精度の高度化を達成した点、大変意義ある成果である。

世界中で実構造物製造に対してadditive manufacturing(3Dプリンタ)の使用が広がり、安全率の高い次世代航空機や自動車の構造部品ですら、議論が白熱する。この時期に「3D器物×応力発光」を推進した我々に殺到した多くの問い合わせは、スマートな可視化が拓く評価、設計、予測の革新という本課題の命題が大変タイムリーで、インパクトを与えたと評価している。

研究成果の概要(英文)：Based on 3D printing technology of nano- or micro functional material, we have promoted the next 2 innovative production techniques of trillion sensors.

[1] For micro wiring technology by 3D printing, we succeeded in micro line printing on three-dimensional objects, securing conductivity of the line, visualizing potent of deterioration in plating quality, and developing a sensor probe that can be printed.

[2] A 3D stress visualization sensing method has been established for sophistication of design and simulation (CAE). We have succeeded in producing a 3D object on which 3D mechanoluminescent sensors are laid and acquiring a mechanoluminescent image according to the structure and load conditions.

The mechanoluminescent information was proved to be effective for accuracy improvement for the simulation. Knowledge has been started bridging as "3D equipment x stress luminescence = rapid simulator"

研究分野：可視化技術

キーワード：センサー・光機能材 トリリオンセンサ 応力発光 3Dプリンタ

1. 研究開始当初の背景

トリリオンセンサは、非連続的に膨大な量のセンサを駆使し、食糧・医療・エネルギー・物流で無意識損失の無い「潤沢な社会」へ挑戦する米国発産学官イニシアチブである。2015年世界版ロードマップの発布 (<http://www.tsensorsummit.org/>) (図1)、「もののインターネット化(IoT)」への全世界的な期待と呼応し、一気に学術・産業界へと研究熱が広がった。実際、上述ロードマップにはセンサ開発要素3本柱として「MEMS/Chip」、「画像センシング」、「3D/印刷デバイス」が明記されている。例えば「印刷デバイス」は、「印刷によるフレキシブルデバイスの連続製造技術の開発(NEDO 施策)」等により日本は材料・技術研究共に世界を先導している。ただ、海外でも印刷による簡易刺青型センサ (J. Wang et. al. Nature Communications, 2014)、生分解センサ給電 (M. Peplow, Nature, 14919, 2014) 等注目報告が相次いだ。なお応募者の独自技術「ナノインクによる生分解性印刷配線・デバイス」も日経エレクトロニクスが Hot News で紹介するなど、学術・産業界にとって、今やるべき研究との認識が強い。この背景の中、大量・安価・低環境負荷が強みの「印刷デバイス」が抱える現時点での最大の問題「3次元集積出来ない事」に関して、集積度の観点から、学術界へ解決研究への期待が高い。一方「画像センシング」でも、応募者は世界に先駆けて力学刺激で発光する応力発光(セラミック粒子、塗料やシート状にして対象物に敷設)の研究に従事し、社会インフラ(橋梁、建物)・製品(耐震部材、水素高圧容器、人工骨)にかかる動的な応力分布、き裂発生・進展の可視化を達成してきた。実際、全ての構造物は数回のモデルによる力学特性評価を行い、CAE(力学シミュレーションに基づく設計支援)・設計条件に還元する。しかし「3次元空間内部への自由なセンサ設置」が困難な為、高精度化に欠かせない内部応力に関する実験力学情報が少なく、CAE(予測)と現実が異なる事、これが問題とされている。

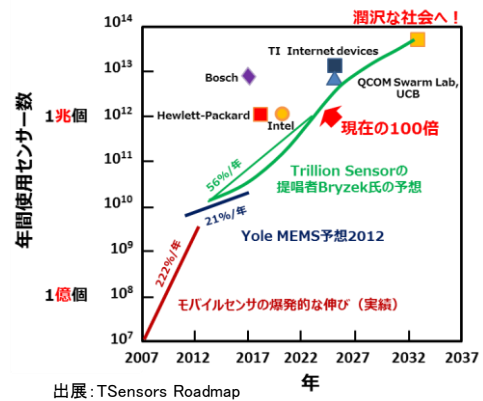


図1 トリリオンセンサ世界へのセンサ数増加予想 (TSensors Roadmap より)

そこで本提案では、共有のボトルネック「センサ・機能性材料の、3次元空間への、自由自在な配置」解決の為、3次元印刷造形装置(3Dプリンタ)に着目し、『センサ・機能材料の3D印刷』を基とした革新的トリリオンセンサ作製技術開発を提案するに至った。

2. 研究の目的

本提案では、トリリオンセンサ時代(非連続的膨大多数のセンサ、年間45兆個、現在の100倍強/2023年)を担う3次元・集積センサの革新的作製技術を開発する。提案者は世界に先駆けて【力学情報の応力発光可視化】、【内部応力可視用の近赤外応力発光】、【ナノインクによる生分解印刷センサ】を達成した。一方これら要素技術(ナノ・マイクロ機能材料)を産業へと活かす『自由自在に、3次元空間に配置、集積する製造技術』は存在しない。そこで本提案では『ナノ・マイクロ機能材料の3D印刷』を基とした革新的トリリオンセンサ作製技術開発として、2課題を行う。

- 【課題1】3D印刷による3次元配線技術の確立と、センサデバイスへの応用
- 【課題2】CAE設計高度化に向けた、3D印刷による内部応力可視化センシング手法の確立

3. 研究の方法

上述の目的を達成する手段として、下記を遂行する事を計画した。

- 【課題1】3D印刷による3次元配線技術の確立と、センサへの応用
 - (1-1)「3D印刷マイクロ・ナノ配線技術」
 - ・微細配線印刷条件、を明らかにする。
 - ・3次元印刷配線条件と導電性確保条件、を明らかにする。
 - (1-2)「センサ材料・デバイス」の試作・実証
- 【課題2】CAE設計高度化に向けた、3D印刷による内部応力可視化センシング手法の確立
 - (2-1)「3D印刷用応力発光インク」
 - ・熱熔融積層応力発光フィラメント、UV硬化型発光インクの作製条件範囲、を明らかにする。
 - (2-2)「応力可視化面の選択導入法」
 - ・造形物外表面、更に内部への応力発光センサの位置選択導入条件、を明らかにする。
 - (2-3)設計高度化に向けた「内部応力像とCAE比較」
 - ・3D印刷面からの応力発光を実験力学データとしてCAEとの比較検討を行う高度化手法を確立する。

4. 研究成果

本提案では『ナノ・マイクロ機能材料の3D配置』を基とした革新的トリリオンセンサ作製技術開発として、2課題を行った。具体的に得られた実績は、それぞれ以下のとおりである。

【課題1】3D印刷による3次元配線技術の確立とセンサデバイスへの応用

3D印刷配線条件を明らかにするため、様々な表面エネルギー・ラフネスファクター、ナノ・マイクロ構造を有する高分子基板上への細線形成を行い、ポリ乳酸PLAなどの3D器物材料上への微細配線造形に成功した(L/S=150 μ m-2mm)(例えば、N. Terasaki, *ECS Transactions*, 2017, 図2)。加えて、印刷配線の導電性向上を目的としためっき形成についての検討を行った。その過程で、当初目標にはなかつためっき品質を予測する銅めっき液分析法について確立に成功し、荒れ等のめっき品質の低下をもたらすめっき液状態の可視化に成功した点、産業展開へのインパクトが高い(例えば、T. Koga, N. Terasaki et. al, *J. Electrochem. Soc.*, 2018)。印刷細線の3次元配置したセンサデバイスは、専用3次元印刷機の不調のため、未達となった。一方、導入するセンサ信号のバリエーションを増やすため、複数の磁性ナノ粒子を対象として印刷センサ配線・マイクロ構造形成に関して検討を行った。その結果印刷サイズ要件(吐出液滴1 μ m)を満たす範囲のサイズ制御を達成した。また加熱条件の制御により、機能調整を達成した。

【課題2】CAE設計高度化に向けた3D印刷による応力可視化センシングの確立

3D印刷機物(構造体)外表面、内部への応力発光センサの位置選択導入を目的として、下記を達成した。

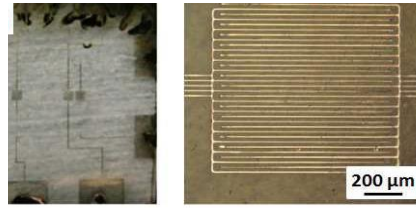
(1) 応力発光計測により、3D印刷器物(造形物)の強度・異方性について可視化し、造形様式・造形方向の関係を明らかにした。なお、特に積層面方向の異方性を抑制し、CAE高度化を考慮した際に適している造形法はインクジェット方式と結論づけた。更に、3Dプリンタ内蔵のプログラムによっては、自動で、残留ひずみによる形状の経年変形抑制を目的とした内部スリットが入ることにも、発光パターンに影響する因子であることを明らかにし、注意すべき3D器物の内部構造に関する指針を得た。

(2) 3次元造形(光硬化)用、応力発光インクの開発に成功した(特許出願)。考慮した因子は、下記の通りである。

- ①母材(ポリマー・接着剤)の種類(例)エポキシ、ウレタン、Si、シアノアクリレート系等、②混入材の種類・サイズ(応力発光粒子)
- ③粒子の表面修飾(粒子と光硬化樹脂間の力学伝達効率)
- ④含有比率(粒子濃度)

(3) 骨端プレート(医療器具)のリバースエンジニアリングデータによる3次元器物(造形物)を介した応力発光によるひずみ分布の可視化に成功した(図4)。これ

ポリ乳酸PLA上への細線印刷



表面粗さと細線印刷条件検討

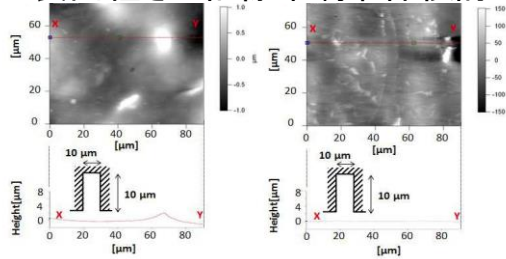


図2 3D器物材料・ナノ形状に対する細線印刷検討

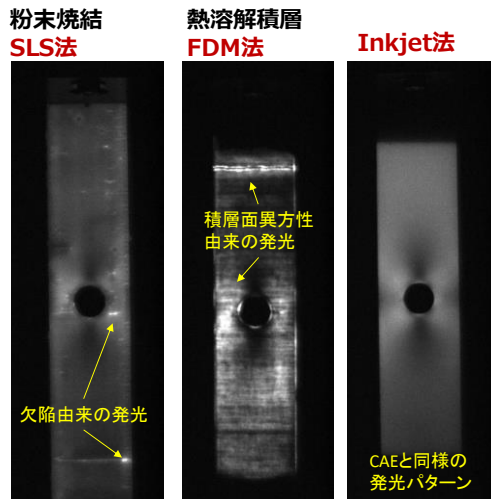
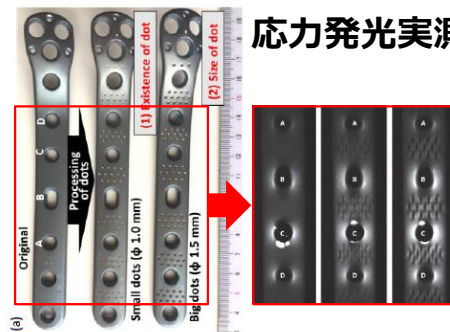


図3 3D器物製造条件と構造異方性の応力発光可視化

応力発光実測



加工シミュレーション

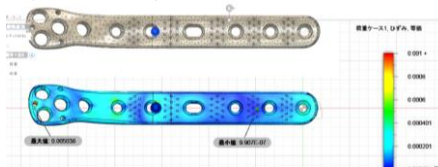


図4 骨端プレートの加工設計の3D応力発光を用いた最適化

により、手術使用性を目的とした微孔加工のための最適設計について、3D 器物の発光パターン・強度から予測することに成功した。これは、3D 器物と応力発光を介した設計の革新に繋がる意義ある成果である (N. Terasaki et. Al. *JJAP*, 2017)。

(4)CAE・設計高度化に向けた 3D 印刷による応力可視化センシングの確立に関しては、「3D 印刷用応力発光インク」を調合し、3D 器物印刷を行う事に成功した。一方で内部導入に関しては、導入精度を鑑み、3D 印刷器物界面に応力発光インクにて接合する手法を採用した。

本提案の最重要かつ最終命題である「設計高度化に向けた応力発光像と CAE 比較」については、①平板、②ダンベル型、③円孔、④切り欠き等を持つ 3D 印刷器物の機械的試験片モデルに加え、実構造物の CAD 情報を基に、⑤工事用つかみバスケット、⑥骨端プレート、⑦車体 (図 5)、⑧産業用ロボット、⑨ 航空機、⑩接合部モデル、について応力発光センサを三次元敷設した 3D 印刷器物を作製し、その構造や荷重印可条件に応じた応力発光画像を取得する事に成功した。更に、実構造物 CAD より構造解析 (シミュレーション・CAE) を行い、応力発光情報を活用する事で、CAE 精度が向上する事を実証した。

(5)得た知見を「3D 器物×応力発光=rapid simulator」として橋渡しするため、全国の公設試の協力のもと、CAE 講座の一環として、応力発光センサ敷設 3D 器物による教師データ提供を行うとともに、CAE 精度向上の方法論確立に向けた取り組みを行った (現在、高知、愛知、福井、京都、東京にて実施、今後 3 県予定)。CAE・シミュレーションを駆使したモデルベース設計、寿命予測などの CPS デジタルエンジニアリングが世界的に注目される中、本課題開発 3 次元センサにより取得した実空間情報を活用し、CAE 情報精度の高度化を達成した点、大変意義ある成果と評価できる。

本課題取り組みの最中、世界中で実構造物製造に対して additive manufacturing (3D プリント) の使用が広がり、安全率の高い次世代航空機や自動車の構造部品ですら、使用議論が白熱している。実際この時期に「3D 器物×応力発光」を推進していた我々には、評価、設計、予測の革新を求めて多くの問い合わせがあった。これらを鑑み、本課題が大変タイムリーでインパクトのある課題設定であったこと、更に、「実構造物」の観点では additive manufacturing には解決すべき課題も多く見えてきていることから、本取り組みをベースとして、「実構造物 additive manufacturing」を見据えた新たなプロジェクト設立が必要であると考えている。

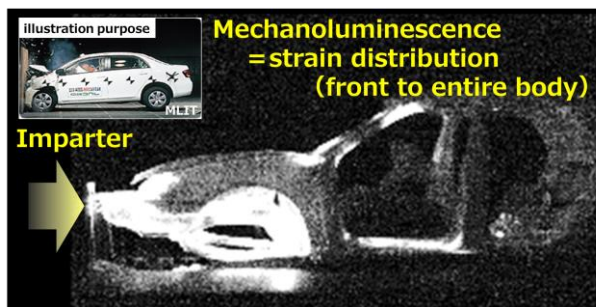


図 5 精密 3D 器物を使用した車体正面衝突時のひずみ伝搬の可視化 (CAE に対する教師データ提供)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

(1) 寺崎 正, Innovative First Step toward Mechanoluminescent Ubiquitous Light Source for trillion sensors, *SENSORS AND MATERIALS*, 28, 827-836 (2018), <http://dx.doi.org/10.18494/SAM.2016.1241>

(2)寺崎 正、藤尾 侑輝、坂田 義太朗、上原 雅人、田原 竜夫, Direct visualization of stress distribution related to adhesive through mechanoluminescence, *ECS Transactions*, 75-45. 9-16 (2017), doi: 10.1149/07545.0009ecst

(3)寺崎 正、Kristen Dorsey、Mitsutoshi Makihata、Shunichi Arakawa、David Rolfe、John Herr、Albert P. Pisano, Micro printing using microfluidics for printed biodegradable devices in trillion sensing *ECS Transactions*, 75-41. 13-19 (2017). doi: 10.1149/07541.0013ecst

(4)菊永 和也、寺崎 正, Detection of Moisture Adsorption on Joining Surface Using Static Electricity Distribution, *ECS Transactions*, 75-48. 33-38 (2017).

(5) Nao Terasaki, Takashi Toyomasu and Motoki Sonohata, Mechanoluminescence assisting agile optimization of processing design on surgical epiphysis plates, *Japanese Journal of Applied Physics*, 57, 04FM10 (2018).

<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.04FM10>

(6) 古賀 淑哲、坂田 義太朗、野中 一洋、寺崎 正, Spectroscopic and Electrochemical Analysis of Cu(I) in Electroplating Solution and Evaluation of Plated Films, *JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY*, D467-D471 (2018).

doi: 10.1149/2.0811810jes

(7) 古賀 淑哲、坂田 義太朗、野中 一洋、寺崎 正, Electrochemical Formation and Accumulation of Cu(I) in Copper Sulfate Electroplating Solution, *JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY*, D467-D471 (2018), doi: 10.1149/2.0301810jes

他 1 件

〔学会発表〕（計 44件）

- (1) 寺崎 正, 急拡大が見込まれるトリリオンセンサの動向, 2016 最先端実装技術シンポジウム, 東京 (招待講演)
- (2) 寺崎 正, トリリオンセンシング ～IoT 時代の官能検査に向けて～, Jisso 技術ロードマップ 専門委員会, 東京 (招待講演) (東京)
- (3) 寺崎 正, トリリオンセンサの開発とその展望, シーズとニーズの会 2016 年度特別例会, 東京 (招待講演)
- (4) 寺崎 正, トリリオン (1兆個) センサが拓く未来, 真空フォーラム 2016, 東京 (招待講演)
- (5) 寺崎 正, トリリオン (1兆個) の開発動向, 産総研テクノブリッジ in 九州 (ミニマルエグゼクティブ), 福岡 (招待講演)
- (6) 寺崎 正, 3D3 機器 (3D プリンタ, 3D スキャナ) ×応力発光, 2016 年度 計測分科会 形状計測研究会, 高松 (招待講演)
- (7) 寺崎 正, トリリオンセンサの世界観と IoT クラウドへの展開, ISIT 特別オープンセミナー (招待講演) (2017)
- (8) 寺崎 正, JIEP 最先端実装技術シンポジウム, トリリオンセンサ -見えない価値の可視化技術 (招待講演) (2017)
- (9) 寺崎 正, 高分子マルチマテリアル破壊予兆の応力発光可視化, 高分子ナノテクノロジー研究会 (招待講演) (2017)
- (10) 寺崎 正, 藤尾侑輝, 応力発光によるマルチマテリアル破壊予兆・スマート設計への取り組み, 石川県次世代産業育成講座・新技術セミナー (招待講演) (2017)
- (11) 寺崎 正, Trillion Sensing & Killer Visualization, ITRI-AIST 6TH Joint Symposium (招待講演) (国際学会) (2017)
- (12) 寺崎 正, トリリオン (1兆個) センサ —見える、への挑戦—, 第 5 回アンビエント技術セミナー (招待講演) (2017)
- (13) 寺崎 正, IoT 社会におけるトリリオン (一兆個) センサの世界, 第 161 回産学交流サロン (招待講演) (2017)
- (14) 寺崎 正, トリリオン (1兆個) センサー人への、AI への見える化、への挑戦—, ミニマルファブビジネスセミナー (招待講演)
- (15) 寺崎 正, 現場の見える化を拓く計測 -見えないものの可視化とその効果-, 29 年度第 2 回ものづくり大分産学交流会 (招待講演)
- (16) 寺崎 正, トリリオンセンサによるマルチマテリアル可視化, 先端光機能材料シンポジウム (招待講演)
- (17) 寺崎 正, トリリオンセンサ—見えないものの可視化技術, 日本実装学会春年会 (招待講演)
- (18) 寺崎 正, トリリオン (一兆個) センシング -人、AI への見える化-, 日本セラミックス協会 春年会 (招待講演)
- (19) 寺崎 正, 応力発光材料を用いた高分子応力分布の可視化技術, 技術情報協会セミナー (招待講演)
- (20) 寺崎 正, トリリオンセンサによる SMART Visualization -「見えないものの可視化」は、判断・予測へ, 2018 実装学会ワークショップ (招待講演)
- (21) 寺崎 正, マルチマテリアル戦略: 応力発光による“見える”接着評価, 第 100 回一般社団法人軽金属学会 (招待講演)
- (22) 寺崎 正, 藤尾 侑輝, 坂田 義太郎, マルチマテリアル製造インテリジェンス～次世代構造部材の破壊予兆・CAE 高度化を拓く応力発光, イノベーションシーズ講演会 (招待講演)
- (23) 寺崎 正, 藤尾 侑輝, 坂田 義太郎, Society 5.0 を目指す見える化技術 —応力発光を例として—, Digital Engineering 講習会 (招待講演)
- (23) 寺崎 正, トリリオンセンサが拓く SMART Visualization, JAPEC 第 2 回研究会 (招待講演)
- (25) 寺崎 正, 藤尾 侑輝, 坂田 義太郎, 3D3×応力発光技術による設計の高度化 in あいち, あいち産業科学技術センターセミナー (招待講演)
- (26) 寺崎 正, 藤尾 侑輝, 坂田 義太郎, 3D3×応力発光技術による設計の高度化 in 福井, ふくい CFRP 研究開発センターセミナー (招待講演)
- (27) 寺崎 正, 藤尾 侑輝, 坂田 義太郎, 3D3×応力発光技術による設計の高度化 in 高知, 高知県技術セミナー (招待講演)
- (28) 寺崎 正, 藤尾 侑輝, 坂田 義太郎, 3D3×応力発光技術による設計の高度化 in 京都, 京都府 CAE セミナー (招待講演)
- (29) 寺崎 正, 藤尾 侑輝, 坂田 義太郎, Smart visualization of potent and process of destruction in multi-material and light weighting concept using mechanoluminescent functional material, 5th Annual World Congress of Smart Materials-2019 (WCSM-2019) (招待講演)
- (30) 寺崎 正, 藤尾 侑輝, 坂田 義太郎, Smart visualization of potent and process of destruction in multi-material and light weighting concept using mechanoluminescent functional material, Energy Materials and Nanotechnology 2018 (招待講演)
- (31) 寺崎 正, 藤尾侑輝, 加藤正樹, 近藤 光一郎, 応力発光による「構造最適化の見える化」, 2019 年応用物理学会春季講演会

他、招待講演 10 件、一般発表 4 件（うち国際 2 件）

〔図書〕（計 1 件）

(1) 寺崎 正、藤尾 侑輝、坂田 義太郎、高分子材料の残留応力発生要因究明と低減対策、応力発光材料を用いた高分子応力分布の可視化技術、技術情報協会（2017）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：積層造形用材料及び応力分析用立体造形物並びに構造物の設計改善方法

発明者：寺崎正、菊永和也

権利者：産業技術総合研究所

種類：

番号：特許、PCT/JP2017/010699（W I P O）

出願年：2017 年 03 月 16 日

国内外の別： 外国

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：菊永 和也

ローマ字氏名：KIKUNAGA Kazuya

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：エレクトロニクス・製造領域

職名：主任研究員

研究者番号（8 桁）：10581283

研究分担者氏名：古賀 淑哲

ローマ字氏名：KOGA Toshiaki

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：エレクトロニクス・製造領域

職名：主任研究員

研究者番号（8 桁）：60356970

研究分担者氏名：坂田 義太郎

ローマ字氏名：SAKATA Yoshitaro

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：エレクトロニクス・製造領域

職名：主任研究員

研究者番号（8 桁）：70636406

研究分担者氏名：藤尾 侑輝

ローマ字氏名：FUJIO Yuki

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：エレクトロニクス・製造領域

職名：主任研究員

研究者番号（8 桁）：90635799

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。