

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H04132

研究課題名（和文）銅ナノ粒子を用いたレーザー直接描画による微細配線形成およびレーザー焼成機構の解明

研究課題名（英文）Formation of micro-wiring and the mechanism of laser direct writing using copper nanoparticle

研究代表者

渡辺 明（Watanabe, Akira）

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：40182901

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,500,000円

研究成果の概要（和文）：銅ナノ粒子を用いたレーザープロセッシングによって、フレキシブル透明ポリマー基板上へも高導電性微細パターンを形成することが可能な手法を開拓することを目的とした研究を行った。これによって、ポリマーフィルム上のレーザー描画Cuマイクログリッド構造の曲げによる抵抗値変化を用いたウェアラブルセンサー型デバイスが可能となった。また、新規開発3Dレーザー直接描画により、Cuナノ粒子を用いた導電性3D構造の形成に関する検討を行った。さらに、酸化銅ナノ粒子と酸化グラフェンのハイブリッド膜のレーザーシンタリングによる銅系導電性ハイブリッド膜の形成と、赤外線センサーやアンテナ型化学センサーへの応用を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、エネルギー問題や環境問題の顕在化から、より環境負荷の低いプロセスが可能な材料や技術に関心が向けられている。プリントドエレクトロニクス技術は、次世代の製造技術として注目されているが、従来の研究においては焼成温度が低い銀系ナノ粒子が用いられてきたが、銀の微細配線間でのイオンマイグレーションがデバイス不良の問題となってきた。銅系ナノ粒子を用いたプリントドエレクトロニクス技術の開発が求められていた。本研究では、これまでに検討を行ってきたレーザー直接描画法を銅ナノ粒子系に適用し、高導電性の銅微細パターンを透明フレキシブルなポリマー基材上にも形成できる手法を開拓することができた。

研究成果の概要（英文）：The conductive micro-pattern formation on a flexible transparent polymer film by laser processing using copper nanoparticles was studied. A wearable sensor based on the resistance change of a copper micro-grid structure prepared on a polymer film during bending was developed. The formation of a 3D conductive micro-structure using copper nanoparticles was studied by using a new developed 3D laser direct writing machine. A conductive hybrid film was prepared by laser sintering of a copper oxide nanoparticle-graphene oxide hybrid film, which was applied to an infrared sensor and an antenna-type chemical sensor.

研究分野：物質科学

キーワード：レーザープロセッシング レーザー直接描画 銅ナノ粒子 プリントドエレクトロニクス フレキシブルデバイス 酸化グラフェン 還元型酸化グラフェン 酸化銅ナノ粒子

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。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー問題や環境問題の顕在化から、より環境負荷の低いプロセスが可能な材料や技術に関心が向けられている。電子デバイス製造における近年のイノベーションの幾つかを図1に示した。プリントドエレクトロニクスは、低環境負荷・低エネルギー消費型の製造技術として、インクジェット法を中心として活発な研究が展開されてきたが、その底流には、光・電子機能性の無機・有機ハイブリッド材料やナノ材料研究の進展がある。プリントドエレクトロニクスの概念はさらに拡張され、ラージエリアエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス、さらにはウェアラブルエレクトロニクスとして展開され、IoT時代の新たな電子デバイスのイメージの一つとなっている。今後、プリントドエレクトロニクスは、3Dプリンティングと融合し、3Dエレクトロニクス技術へと向かっていくと考えられる。現時点においても、MID (Molded Interconnect Device、成形回路部品) や3Dレーザー描画技術に基づくLDS (Laser Direct Structuring レーザー直接構造化)が3Dエレクトロニクス技術として、製造プロセスに用いられている。それらにおいては、従来法における真空プロセスを用いない可溶性の有機、無機・有機ハイブリッド、およびナノ材料系の機能材料を用いたウェットプロセスであることが共通点となっている。これらは、IoT時代における製品開発期間や商品サイクルの短縮化や多様なニーズへの対応に合致した特性となっている。

このような技術の中で、インクジェット法を中心としたプリントド・エレクトロニクスは、次世代の製造技術として注目され、多くの研究開発が行われてきている。インクジェット法では、インクジェットヘッドから数ピコリットル(pl)のインク液滴を基板に噴射して描画が行われる。この場合、通常のインクジェット法では1 pl以下の液滴の制御が困難であることと、着弾後にインク液滴が濡れ性によって基板上で広がってしまい描画分解能が落ちるといった問題があった。このため、線幅50 μm以下の微細パターン形成は困難であった。また、インクジェット法で形成される金属ナノ粒子微細パターンは、描画後には、金属ナノ粒子安定化のための有機修飾基、インクジェット描画中のインク詰まりを防ぐための高沸点溶媒等を含んでおり、その状態では導電性を有していない。描画パターンを高導電性の金属相にするためには、銀(Ag)ナノ粒子で250℃前後、金(Au)ナノ粒子で350℃前後での焼成が必要であり、一般的な電気炉

焼成を用いた場合には、数十分の焼成時間が必要となる。このような焼成プロセスは、樹脂基板を用いた場合には、その耐熱性の面から問題となってくる。これに対して我々は、レーザー光をAgナノ粒子に集光照射・スキャンすることによって、微細なサブミクロンレベルでの金属配線描画が可能であることを世界に先駆けて初めて報告していた。インクジェット法とレーザー直接描画法のプロセスの比較を図2に示した。これらの従来の研究においては、他の金属ナノ粒子に比べてシンタリング(焼成)温度が低いAg系ナノ粒子が用いられてきたが、近年Ag微細配線間での銀イオンのマイクレーションがデバイス不良の問題となってきており、銅系ナノ粒子インクを用いたプリントドエ

レクトロニクス技術の開発が求められている。しかし、銅系ナノ粒子インクのシンタリングによる金属化においては、銅の酸化性の高さが課題となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、より環境負荷の低いプロセスが可能な材料や技術に関心が向けられている背景のなかで、銅ナノ粒子を用いたレーザープロセッシングによって、フレキシブル透明ポリマー基板上へも高導電性微細パターンを自在に形成することが可能な手法を開拓することを目的

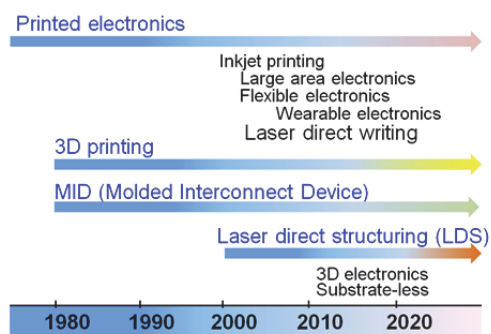


図1 電子デバイス製造技術における近年のイノベーション。

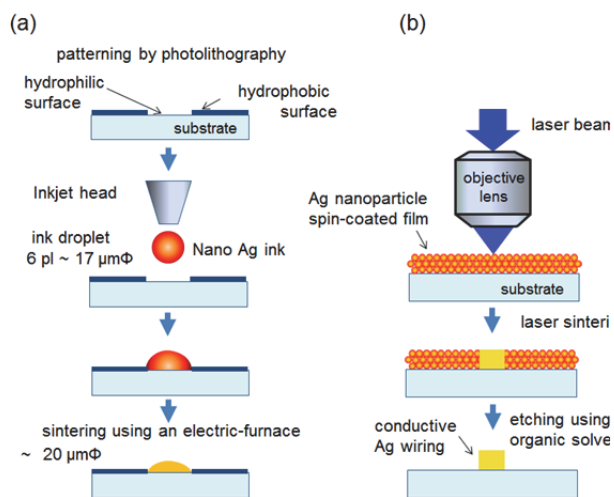


図2 金属ナノ粒子インクを用いたインクジェットプリンティング法(a)およびレーザー直接描画法(b)の比較。

とした。さらに、その手法を用いて、フレキシブルエレクトロニクスデバイス、3D レーザー描画技術、ナノハイブリッド材料を用いた導電性パターン形成とデバイス応用等についての検討を行った。

### 3. 研究の方法

レーザー直接描画法に用いられているレーザー光源としては、パルスレーザーおよび連続波 (CW) レーザーがあるが、ナノ材料のレーザーシンタリングにおいては、パルスレーザーを用いた場合にはレーザーアブレーション (爆蝕) が主な現象となってしまう

ため、CW レーザーを用いた検討を行った。CW レーザーとしては、405 nm ブルーバイオレット半導体レーザー、445 nm ブルーレーザー、532 nm DPSS (Diode Pumped Solid State) レーザー等を用いた。レーザー光のスキャンによりオンデマンドに種々レーザー直接描画を行うための装置として、PC 制御自動ステージ系 (図 3) およびガルバノスキャナー系 (図 4) を自作した。PC 制御自動ステージ系においては、対物レンズを用いてレーザー光を集光してレーザー直接描画を行うので、レーザーの集光スポットサイズ (100x 対物レンズで 1 μm 前後) の微細パターンニングが可能であるという特徴がある。また、図 3 に示すような、PC 制御でナノ粒子インクの塗布・スピコート製膜を同時に行うことのできる layer-by-layer 法

での 3D レーザー直接描画装置を新たに開発して実験に用いた。ガルバノスキャナー系を用いたレーザー直接描画法は、焦点距離の長い f-θ レンズを用いるため、描画分解能の点では PC 制御自動ステージ系に及ばないが、ガルバノミラー制御による高速スキャンが可能であり、深い焦点深度を生かして、3D 表面へのレーザー描画が可能であるという特徴がある。

### 4. 研究成果

#### (1) Cu ナノ粒子のレーザーシンタリング

銅ナノ粒子を用いたインクジェット法による微細配線形成においては、Cu ナノ粒子で微細パターンを形成した後に数十分間の焼成が必要であるため、その処理中に Cu ナノ粒子表面が酸化してしまうという問題があった。このため、水素混合ガス等の還元性雰囲気での焼成が行われている。これに対してレーザーシンタリングは、レーザー照射後数 マイクロ秒以内にナノ粒子のシンタリングが起こる高速なプロセスであるため、酸素による Cu ナノ粒子表面の酸化が起こりづらいという特徴を有している。このため、空気中においても導電性の Cu 微細配線パターンを形成することが可能であった。しかし、銅ナノ粒子の粒径依存性があり、数ナノメートルサイズの Cu ナノ粒子インクでは空気中においてもレーザーシンタリングで導電性パターンが形成されたのに対して、粒径が数十～数百ナノメートルの Cu ナノ粒子インクでは、粒子間の空隙を酸素が拡散するために酸化銅構造となってしまうため、空気中では導電性は得られなかった。酸化構造の形成は、レーザーシンタリング膜の顕微ラマンスペ

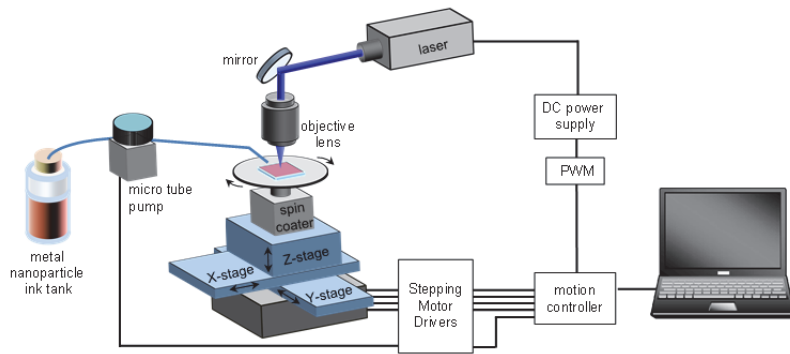


図 3 PC 制御自動ステージを用いたレーザー直接描画装置。

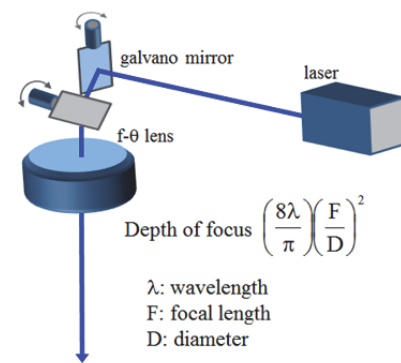


図 4 ガルバノスキャナーおよび f-θ レンズを用いたレーザー直接描画装置。

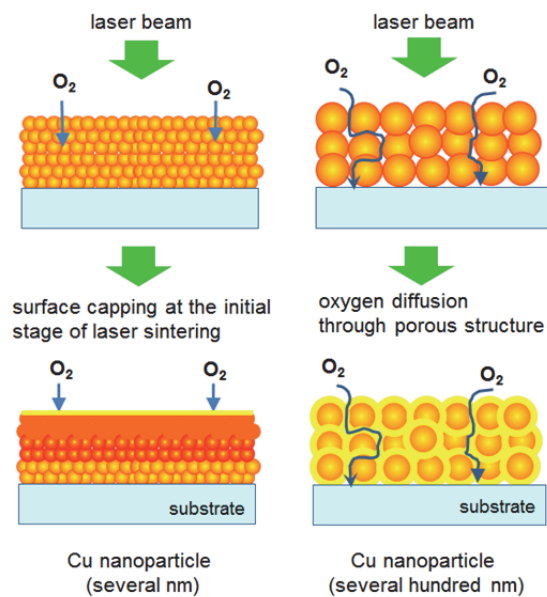


図 5 Cu ナノ粒子インクのレーザーシンタリングにおけるナノ粒子サイズの影響。

図 5 Cu ナノ粒子インクのレーザーシンタリングにおけるナノ粒子サイズの影響。

クトルによる、Cu<sub>0</sub>, Cu<sub>2</sub>O バンドの形成からも示された。粒径が比較的大きく保存安定性の良い Cu ナノ粒子系において、酸素拡散による酸化銅形成を低減する手法としては、粒径分布のあるナノ粒子系とすることで、粒子間の空隙を減少させることが考えられる。図 6 には、粒径が 5 nm 前後の Cu ナノ粒子インクを用いて、405 nm レーザー直接描画法により、透明フレキシブルなポリエチレンテレフタレート (PET) フィルム上に形成した Cu マイクログリッドパターンを示した。これらの Cu マイクログリッドパターンは、曲げによる抵抗値変化を示し、ウェアラブルセンサーデバイスへの応用が可能であった (図 7)。

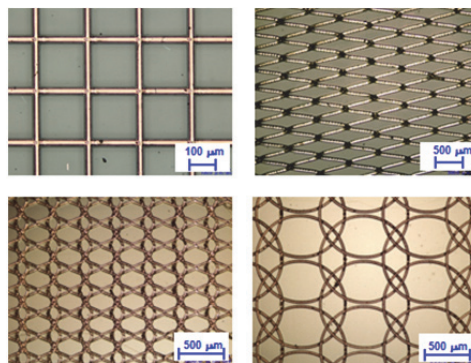


図 6 Cu ナノ粒子インクを用いたレーザー直接描画法により形成した Cu マイクログリッド。構造。

## (2) Cu ナノ粒子を用いたレーザー直接描画による導電性 3D 構造形成

図 1 に示したような電子デバイス製造技術における近年のイノベーションの流れから、3次元に配線された電子デバイスに関する技術が今後重要になると考えられる。Cu ナノ粒子を用いたレーザー直接描画法を、図 3 に示すような PC 制御によるスピコート製膜と xyz 3 軸移動でレーザー描画をプログラム制御により自動で繰り返し行えるような装置を開発し、3D 導電性微細配線に関する検討を行った。図 8 には、Cu ナノ粒子インクを用いた 3D レーザー直接描画法による、3D 導電性微細構造体形成プロセスを模式的に示した。Cu ナノ粒子インク塗布膜上にレーザー直接描画法で橋脚状の構造体を形成した後、その上に Cu ナノ粒子インクをオーバコートし、レーザー光の焦点を Z 方向上方にシフトさせてレーザー描画を行った。これによって、橋脚を橋状構造体で連結し、未照射部の Cu インクを溶媒で除去することによって、3次元的な空間を有する 3D 導電性微細構造体の形成を行った。図 9 には、上記のプロセスで形成した 3D 銅微細構造体の走査電子顕微鏡 (SEM) 像を示した。また、図 10 には、Cu ナノ粒子インクの 3D レーザー描画で形成した 3D 微細配線の一例を示した。

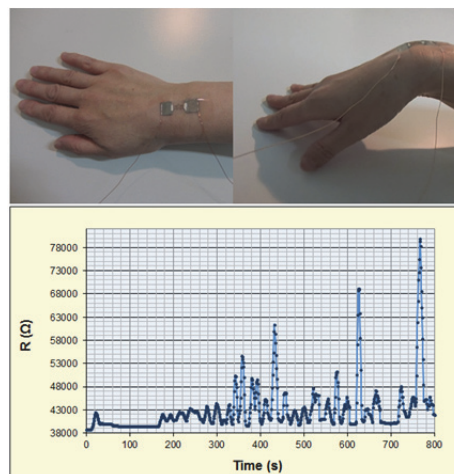


図 7 Cu マイクログリッドパターンの曲げによる抵抗値変化を用いたウェアラブルセンサー。

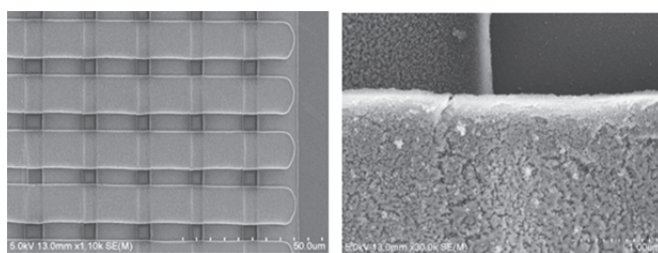


図 9 3D 銅微細構造体の SEM 像

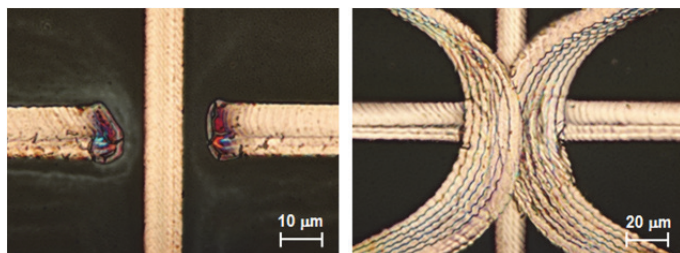


図 10 Cu ナノ粒子インクの 3D レーザー描画で形成した 3D 微細配線の光学顕微鏡像。

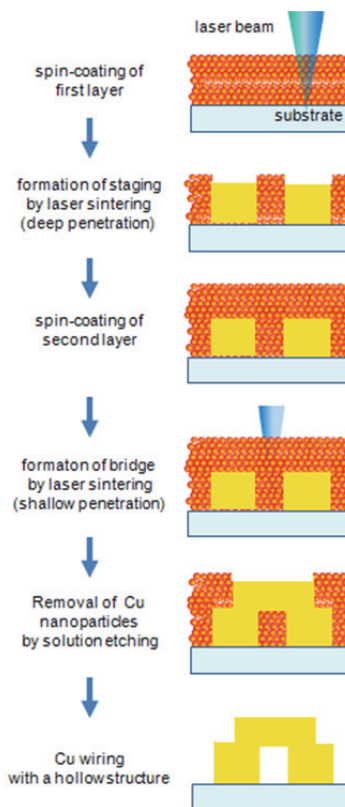


図 8 Cu ナノ粒子インクを用いた 3D レーザー直接描画法による、3D 導電性微細構造体形成プロセス。

### (3) 酸化銅ナノ粒子と酸化グラフェンのハイブリッド膜のレーザー直接描画による導電性パターン形成とデバイス応用

銅ナノ粒子インクは、表面酸化による保存安定性の問題があることから、酸化銅や亜酸化銅系のナノ粒子の検討が近年行われている。また、金属系のナノ粒子に加えて、カーボン系のナノ材料が、新たな機能材料として注目されている。酸化グラフェン(GO)は、グラフェンが酸素含有基で置換された構造を有し、水等の極性溶媒に分散性を有し、光還元等によって導電性の還元型酸化グラフェン(rGO)となることから、プリンタブルエレクトロニクスにおいて導電性構造を形成するための新規材料として注目されている。そこで、酸化銅ナノロッドとGOとのハイブリッド膜を形成し、レーザーシントリングによる導電性構造の形成およびデバイス応用に関する検討を行った。図11には、酸化銅ナノロッド-酸化グラフェンハイブリッド膜への405nmレーザー光スキャンで形成されたCuラインパターンの光学顕微鏡像を示したが、レーザー照射部では酸化銅の還元によってCuが形成されることが、顕微ラマンスペクトルや表面抵抗率の測定から示された。酸化銅は炭素が存在する場合、高温加熱によって炭酸ガスを発生し銅に還元されることが知られているが、GO共存下では、レーザー光照射によるrGOの生成、酸化銅の還元とrGOの再酸化のサイクルが効果的に起こり、図11に示されるような、銅系導電性ハイブリッド膜が形成されると考えられる。このような導電性ハイブリッド膜は、抵抗温度係数 $\alpha$ が非常に大きく(-1.18%/°C)、赤外線に感度を有するセンサーとして機能した。また、レーザー直接描画法によってメアンダーライン型のアンテナ構造をPETフィルム上に形成し、アンテナ型化学センサーとしての特性を、ネットワークアナライザを用いたリターンロススペクトルの変化から調べたところ、図12に示すような、溶媒の誘電率への顕著な感応性が確認された。このような、金属とカーボンのナノ材料からなる導電性ハイブリッド膜は、従来の金属材料に新たな機能が付加された新規機能材料として期待される。

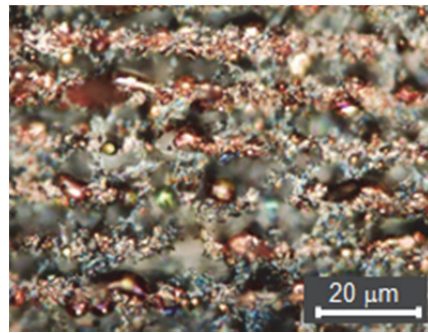


図11 酸化銅ナノロッド-酸化グラフェンハイブリッド膜への405nmレーザー光スキャンで形成されたCuラインパターン。

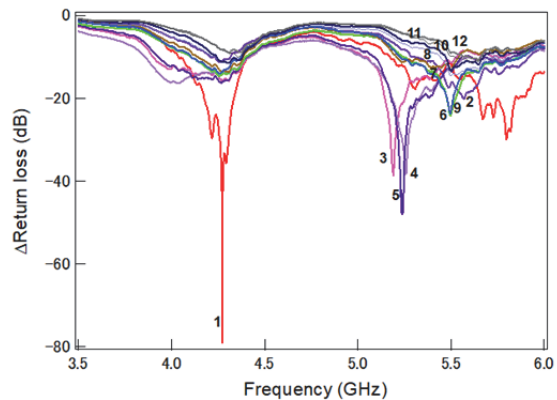


図12 酸化銅ナノロッド-酸化グラフェンハイブリッド膜へのレーザー直接描画で形成したメアンダーライン型アンテナセンサーの種々誘電率溶媒によるリターンロススペクトル変化(1) 水, (2) DMSO, (3)DMF, (4) メタノール, (5) アセチルアセトン, (6) エタノール, (7) アセトン, (8) イソプロピルアルコール, (9)2-メチルエタノール, (10) エチルアセテート, (11) トルエン, (12) n-ヘキサン。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Cai Jinguang, Lv Chao, Aoyagi Eiji, Ogawa Sayaka, Watanabe Akira	4. 巻 10
2. 論文標題 Laser Direct Writing of a High-Performance All-Graphene Humidity Sensor Working in a Novel Sensing Mode for Portable Electronics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 23987 ~ 23996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.8b07373	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 Watanabe Akira, Cai Jinguang, Ogawa Sayaka, Aoyagi Eiji, Ito Shun	4. 巻 10813
2. 論文標題 Laser direct writing using nanomaterials and device applications towards IoT technology	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 10813, Advanced Laser Processing and Manufacturing II	6. 最初と最後の頁 K-1-K-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2327081	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 Akira Watanabe, Jinguang Cai	4. 巻 10520
2. 論文標題 Akira Watanabe, Jinguang Cai, Laser direct writing of reduced graphene oxide micropatterns and sensor applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 10520, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XII	6. 最初と最後の頁 P-1-P-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2288355	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 Watanabe Akira, Cai Jinguang, Ogawa Sayaka, Aoyagi Eiji, Ito Shun	4. 巻 31
2. 論文標題 Conductive Micropatterns Prepared by Laser-Induced Reduction of Graphene Oxide	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 447 ~ 450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.31.447	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 Cai Jinguang, Watanabe Akira, Lv Chao	4. 巻 30
2. 論文標題 Laser direct writing of carbon-based micro-supercapacitors and electronic devices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Laser Applications	6. 最初と最後の頁 032603 ~ 032603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2351/1.5040648	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 Chao Lv, Cun Hu, Junhong Luo, Shuai Liu, Yan Qiao, Zhi Zhang, Jiangfeng Song, Yan Shi, Jinguang Cai, and Akira Watanabe	4. 巻 9
2. 論文標題 Recent Advances in Graphene-Based Humidity Sensors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 nanomaterials	6. 最初と最後の頁 422-1-422-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano9030422	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 該当する

1. 著者名 渡辺明	4. 巻 1
2. 論文標題 無機・有機ハイブリッド機能材料のレーザープロセッシングとデバイス応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 26-33
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 J. Cai, C. Lv, A. Watanabe	4. 巻 7
2. 論文標題 High-performance all-solid-state flexible carbon/TiO <sub>2</sub> micro-supercapacitors with photo-rechargeable capability	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 415-422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C6RA25136F	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 Akira Watanabe, Jinguang Cai	4. 巻 30
2. 論文標題 On Demand Process Based on Laser Direct Writing and the Sensor Application	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Photopolym. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 341-343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.30.341	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 渡辺明, 蔡金光	4. 巻 45
2. 論文標題 ポリマー表面のレーザーカーボン化による平面型スーパーキャパシタ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 627-631
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 該当する

1. 著者名 Jinguang Cai, Chao Lv, and Akira Watanabe	4. 巻 10
2. 論文標題 Laser Direct Writing and Selective Metallization of Metallic Circuits for Integrated Wireless Devices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 915-924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.7b16558	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 Akira Watanabe, Jinguang Cai	4. 巻 N604
2. 論文標題 Laser Direct Writing of Reduced Graphene Oxide Microelectrodes and the Device Application	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2017 ICALEO Proc.	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) 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 該当する



1. 著者名 Jinguang Cai, Chao Lv, and Akira Watanabe	4. 巻 N602
2. 論文標題 LASER DIRECT WRITING OF CARBON-BASED MICRO-SUPERCAPACITORS AND ELECTRONIC DEVICES	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2017 ICALEO Proc.	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) 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 該当する

1. 著者名 渡辺明	4. 巻 68
2. 論文標題 金属および半導体系元素ブロックによる電子材料の創製	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 857-863
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 Jinguang Cai, Chao Lv and Akira Watanabe	4. 巻 30
2. 論文標題 Laser direct writing of high-performance flexible all-solid-state carbon micro-supercapacitors for an on-chip self-powered photodetection system	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nano Energy	6. 最初と最後の頁 790-800
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nanoen.2016.09.017	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 Akira Watanabe, Jinguang Cai	4. 巻 -
2. 論文標題 Laser Direct Writing of Conductive 3D Micropatterns Using Metal Nanoparticle Ink	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 IEEE NANO 2016	6. 最初と最後の頁 697-698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICIT.2016.7474911	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 Akira Watanabe, Jinguang Cai	4. 巻 10092
2. 論文標題 Selective metallization based on laser direct writing and additive metallization process	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 Z-1-Z-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2251167	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 渡辺明	4. 巻 -
2. 論文標題 金属ナノ粒子を用いたレーザ直接描画法とそのデバイス応用	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 第85 回レーザ加工学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 104-109
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 Jinguang Cai, Chao Lv, Akira Watanabe	4. 巻 7
2. 論文標題 Facile Preparation of Hierarchical Structures Using Crystallization Kinetics Driven Self-Assembly	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 18697-18706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.5b05177	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 該当する

1. 著者名 J. Cai, L.Chao, and A. Watanabe	4. 巻 4
2. 論文標題 Cost-effective fabrication of high-performance flexible all-solid-state carbon micro-super capacitors by blue-violet laser direct writing and further surface treatment	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A	6. 最初と最後の頁 1671-1679
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C5TA09450J	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 Akira Watanabe, Jinguang Cai	4. 巻 97360
2. 論文標題 Formation of copper micropatterns by laser direct writing using copper nanoparticle ink	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 9736	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) 10.1117/12.2211215	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 Jinguang Cai, Akira Watanabe	4. 巻 97361
2. 論文標題 Flexible carbon micro-supercapacitors prepared by laser direct writing	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 9736	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) doi:10.1117/12.2210837	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

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 渡辺明
2. 発表標題 ナノ材料へのレーザー照射による 物質変換および微細パターン形成と IoT 関連デバイスへの応用
3. 学会等名 日本セラミックス協会2018年年会サテライトプログラム 第5回MFD (マテリアルファブリケーションデザイン) 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai
2. 発表標題 Device applications of laser direct-written reduced graphene oxide microelectrode
3. 学会等名 第67回高分子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺明, 蔡金光
2. 発表標題 無機ナノ粒子で修飾したレーザー描画還元型酸化グラフェンマイクロ電極
3. 学会等名 第37 回無機高分子研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺明, 蔡金光, 小川沙也加, 青柳英二, 伊藤俊
2. 発表標題 レーザー直接描画による酸化グラフェン-酸化チタン ナノ粒子ハイブリッド膜への微細構造形成
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai, Sayaka Ogawa, Eiji Aoyagi, and Shun Ito
2. 発表標題 Device applications of laser direct-written reduced graphene oxide microelectrode
3. 学会等名 The 35th International Conference of Photopolymer Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai, Sayaka Ogawa, Eiji Aoyagi, and Shun Ito
2. 発表標題 Laser direct writing of nanomaterials and device applications towards IoT technology
3. 学会等名 SPIE Photonics Asia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jinguang Cai, Akira Watanabe, Chao Lv
2. 発表標題 Laser direct writing for energy storage and integrated wireless devices
3. 学会等名 SPIE Photonics Asia ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai, Sayaka Ogawa, Eiji Aoyagi, and Shun Ito
2. 発表標題 Laser reduced graphene oxide-based interdigitated electrode for sensor applications
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jinguang Cai, Chao Lv, and Akira Watanabe
2. 発表標題 Laser Direct Writing of Carbon-Based Micro-Supercapacitors and Electronic Devices
3. 学会等名 2017 ICALEO ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai
2. 発表標題 On Demand Process Based on Laser Direct Writing and the Sensor Application, The 34th International Conference of Photopolymer Science and Technology
3. 学会等名 ICPST-34 ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai
2. 発表標題 Laser Direct Writing of Reduced Graphene Oxide Microelectrodes and the Device Application
3. 学会等名 2017 ICALEO (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺明, 蔡金光
2. 発表標題 元素ブロック材料を用いた平面型マイクロスーパーキャパシタ
3. 学会等名 第66回高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺明, 蔡金光
2. 発表標題 レーザー直接描画法を用いたオンデマドプロセスによるフレキシブル材料へのデバイス形成
3. 学会等名 第66回高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺明, 蔡金光
2. 発表標題 レーザー直接描画法を用いたオンデマドプロセスによる金属配線パターン形成
3. 学会等名 第66回高分子学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺明, 蔡金光
2. 発表標題 金属ナノ粒子および酸化グラフェンのレーザー直接描画によるマイクロパターン形成およびセンサー応用
3. 学会等名 第36回無機高分子研究討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai
2. 発表標題 Laser direct writing of reduced graphene oxide micropatterns and sensor applications
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jinguang Cai, Akira Watanabe, Chao Lv
2. 発表標題 Laser direct writing for energy storage and integrated wireless devices
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺明
2. 発表標題 金属ナノ粒子を用いたレーザー直接描画法と そのデバイス応用
3. 学会等名 第85 回レーザー加工学会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai, Gang Qin, Lidan Fan
2. 発表標題 Formation of Copper Micro-Patterns on a Flexible Polymer Substrate via Laser Direct Writing Using Copper Nanoparticle and the Application to a Sensor Device
3. 学会等名 第65回高分子学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡辺 明, 蔡金光
2. 発表標題 レーザー直接描画法によるオンデマンド微細パターンニングとデバイス応用
3. 学会等名 第65回高分子討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡辺 明, 蔡金光
2. 発表標題 金属ナノ粒子を用いたレーザー直接描画法による フレキシブルポリマーフィルムへの めっき用シード層のオンディマンド形成
3. 学会等名 第35 回無機高分子研究討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡辺明, 蔡金光
2. 発表標題 レーザー直接描画とめっきプロセスの併用による金属配線形成
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai
2. 発表標題 Laser Direct Writing of Conductive 3D Micropatterns Using Metal Nanoparticle Ink
3. 学会等名 IEEE NANO 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai
2. 発表標題 Selective metallization based on laser direct writing and additive metallization process
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Cai Jinguang, Watanabe Akira
2. 発表標題 Carbon-based micro-supercapacitors prepared by direct CW laser writing
3. 学会等名 34回無機高分子研究討論会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Akira Watanabe, Gang Qin, Jinguang Cai
2. 発表標題 Laser Direct Writing on Copper Nanoparticle Film by LightScribe Technique
3. 学会等名 ICPST-32, Japan, Chiba
4. 発表年 2015年

1 . 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai
2 . 発表標題 Formation of copper micropatterns by laser direct writing using copper nanoparticle ink
3 . 学会等名 SPIE Photonics West 2016 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Jinguang Cai, Akira Watanabe
2 . 発表標題 Flexible carbon micro-supercapacitors prepared by laser direct writing
3 . 学会等名 SPIE Photonics West 2016 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Akira Watanabe, Jinguang Cai,
2 . 発表標題 Laser Direct Writing of Conductive Micropatterns Using Copper Nanoparticle Ink toward 3D Printing of Interconnection
3 . 学会等名 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology, 3D Printing in Mechatronics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Akira Watanabe1, Jinguang Cai ,Gang Qin ,Lidan Fan
2 . 発表標題 Formation of copper micro-patterns on a flexible polymer substrate via laser direct writing using copper nanoparticle and the application to a sensor device
3 . 学会等名 第65回高分子学会年次大会 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 Jinguang Cai, Akira Watanabe
2. 発表標題 Cost-effective fabrication of high-performance flexible all-solid-state carbon micro-supercapacitors by blue-violet laser direct writing
3. 学会等名 第65回高分子学会年次大会（国際学会）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 蔡 金光, 渡辺 明
2. 発表標題 酸化グラフェン膜を用いたマイクロスーパーキャパシタのレーザー直接描画
3. 学会等名 第65回高分子学会年次大会（国際学会）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡辺明
2. 発表標題 金属ナノ粒子を用いたレーザー直接描画法とそのデバイス応用
3. 学会等名 第85回レーザー加工学会（招待講演）
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Jinguang Cai, Akira Watanabe	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 28
3. 書名 Crystallization Kinetics-Induced Self-Assembly of Inorganic Element Blocks and the Surface-Enhanced Raman Scattering Based on Ag Hierarchical Structures, In Yoshiki Chujo (Ed.) New Polymeric Materials Based on Element-Blocks	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----