

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14701

研究課題名（和文）メカニカル・メタマテリアルを用いたフレキシブル電極の開発とメカノイオニクスの創製

研究課題名（英文）A Study on Supercapacitors with Mechanical Metamaterial Electrodes

研究代表者

山田 駿介（Yamada, Shunsuke）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：50811634

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、柔軟性と大きな表面積をもつ3次元メカニカル・メタマテリアル構造をスーパーキャパシタに応用することで、貼り付け型デバイスのための大きなエネルギー密度をもつフレキシブルな蓄電素子を実現することである。メタマテリアルは構造工夫により、硬い無機材料を柔らかくする技術であり、柔軟性を持つ電極を開発した。本研究では、世界初のメタマテリアル構造を電極に導入したスーパーキャパシタを作製・評価した。また、メタマテリアル電極表面にナノ・マイクロ材料を合成・塗布して、マルチスケール構造をもつ電極を実現して電気化学特性を飛躍的に改善できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、柔軟性と大きな静電容量をもつスーパーキャパシタを実現できた。これにより、ウェアブルデバイスや貼り付け型デバイスなど、柔軟性が求められる素子を機械構造により柔軟にすることができる。本研究の延長には、貼り付け型デバイスに搭載されたセンサによる、きめ細やかなヘルスケアの実現と安心安全な社会の実現が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Three-dimensional (3D) electrodes which possess flexibility and large surface area are fabricated, embodied by mechanical metamaterials. The mechanical metamaterials render solid bulk materials flexible by mechanical design, and the 3D electrodes enable us to develop flexible supercapacitors with large energy density for wearable devices. We successfully fabricated and evaluated supercapacitors with 3D electrodes. Capacitance of the supercapacitors are boosted by nano-porous structures on the surfaces of the 3D electrodes. The supercapacitors are able to installed on arbitrary surfaces, for example human and mammal skins, and pipes, and the 3D electrodes can realize electrochemical devices which has good mechanical and electrochemical properties in the future.

研究分野：MEMS

キーワード：メカニカルメタマテリアル スーパーキャパシタ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

有機材料や無機薄膜を利用したフレキシブルエレクトロニクスが注目を集めており、これらの素子を皮膚に貼り付け、生体情報を回収し、ヘルスケアに応用する研究が行われている。これらの電源として、スーパーキャパシタは有望な蓄電素子と考えられており、大きなエネルギー密度を実現するため、電気容量  $C$  の増大が研究されている。電気容量  $C$  は、誘電率  $\epsilon$ 、電極面積  $S$ 、電気二重層の厚み  $d$  を用いて、 $C = (\epsilon S) / d$  と定義され、表面積に比例する。そのため、電極の表面積を大きくできれば、電気容量を増大でき、例えばピラー構造のように厚み方向に大きくすることが行われている。しかしながら、図2に示すようにデバイスの厚みを大きくすると、中立軸からの距離が大きくなり、曲げ変形が生じたときに、電極に引張、収縮応力が発生する。そのため、無機系デバイスは破損する恐れがあり、厚みを大きくできない課題がある。一方、機械特性が優れた有機材料は電気伝導度が低く、膜厚を大きくすると電気特性が低減する。

### 2. 研究の目的

本研究では、無機電極の構造を最適化することで、柔軟性と大きな表面積を実現しつつ、金属の大きな導電性を利用できるはずだと考えた。本研究の核となる電極に関しては、材料由来の硬さに注目するのではなく、硬い金属材料に、3次元メカニカル・メタマテリアル(以下メタマテリアル)を導入することで、大きな電気導電性 ( $10^4 \sim 10^5$  S/cm) と柔軟性 (ヤング率 10 MPa)、表面積  $100 \text{ mm}^2 / \text{mm}^3$  を確保することを提案する。メタマテリアルは応力に対して構造を変化することで破損・破断を防ぐことができる。そのため、本構造をスーパーキャパシタに導入することで、表面積を増やしつつ、柔軟性を実現できる。さらに、メタマテリアルの柔軟性は構造由来のため、材料固有の機械的物性値に依存しない。そのため、使用する材料の選択性に関する自由度が改善でき、従来使用できなかった機械的強度が低い電気化学特性の優れた材料を使用できる。従来技術が実現できなかった柔軟性をもつ  $\mu\text{m} \sim \text{mm}$  オーダーの3次元構造を作製する。さらに、メタマテリアルのヤング率を一定に保ち、表面積を最大化し、柔軟性・伸縮性を維持して、大きな静電容量を持つスーパーキャパシタを実現する。また、ナノ・マイクロ材料を、メタマテリアル構造に用いて、マルチスケール構造をもつ電極を実現する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 「マルチスケール電極の作製・評価」

メタマテリアルは光造形で作製することを検討している。メタマテリアルへの電極作製に関しては、作製方法、電極材料、活性層材料を検討する。メタマテリアルは複雑な構造をもつため、電極作製に影響を与えることが想定される。作製方法として、スパッタリング、原子層堆積法 (ALD)、無電解メッキを検討して、膜質が電気伝導性に与える影響を調査する。スーパーキャパシタの活性材料に関しては、金属ナノワイヤ、カーボン、導電性高分子が挙げられるが、電気化学的な特性と、力学的特性を計測しつつ、最適な材料を決定する。

#### (2) 「電気化学デバイスへの応用」

電極-電解質 (イオンゲル) 構造を作製して、基礎的な電気化学特性の評価を行う。ポテンショスタットを使用して、窒素雰囲気下における、静電容量、電気伝導度を測定する。サイクリックボルタンメトリー、ガルバノスタティックチャージ・ディスチャージを実施して、電気化学特性を確認する。また、応力に対する上記の特性変化を明らかにする。本研究の実用性を示すため、無線センサ端末を駆動して、センシングデータを無線送信することを考えている。具体的には、太陽電池を用いて、作製したスーパーキャパシタを充電して、マイクロコンピュータ、温度セン

サ、RF回路を駆動し、温度データをクラウドにアップロードすることを検討する。

#### 4. 研究成果

メタ材料は3Dプリンタを用いた光造形で作製した。図1に示すように、梁の太さ $100\mu\text{m}$ のメタ材料構造を作製できた。次に表面への作製方法、電極材料、を検討した。メタ材料は複雑な構造をもつため、電極作製に影響を与えることが想定される。そこで、作製方法として、等方的に成膜可能なスパッタリングとめっきによる膜の厚膜化を実施した。図2に示すように、光沢のある3次元構造を実現でき、SEMイメージのように厚み $6.5\mu\text{m}$ をもつ金電極を作製できた。

図3に示すような電極-電解液構造を作製して、電気化学的特性の評価を行った。図4に示すように、3次元電極にしてその表面を多孔質Auで皮膜することで、静電容量の値が180倍大きくなることが判明した。本研究により、3次元電極によるスーパーキャパシタの容量増大が確認できた。しかしながら、3次元電極の骨格となるポリマーを除去できず、機械特性の評価を行うことができなかった。また、表面を多孔質Auで皮膜したが、完全にSnを除去できずに、一部Snが内部存在していた。今後は、金属3次元電極の作製と多孔質Au作製方法の最適化を行い、上記課題を解決したいと考えている。

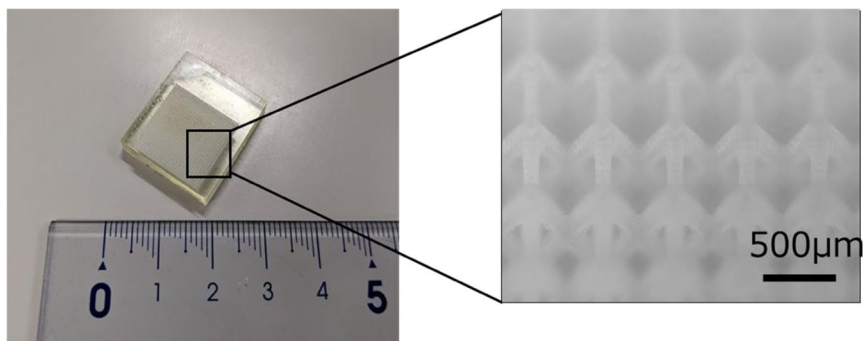


図1 開発した3次元メタ材料

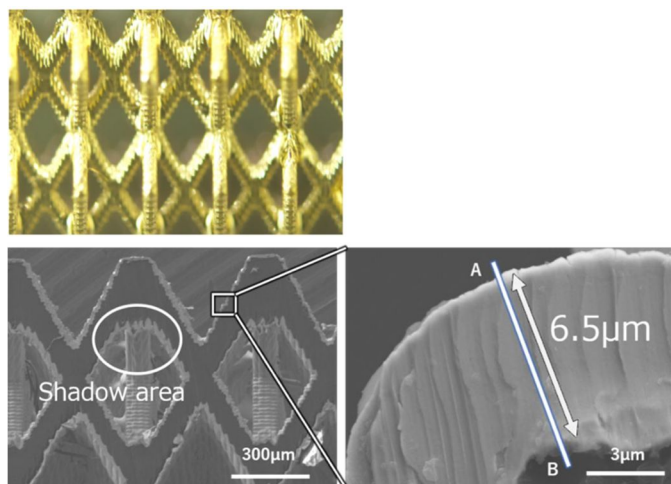


図2 開発した3次元メタ材料電極

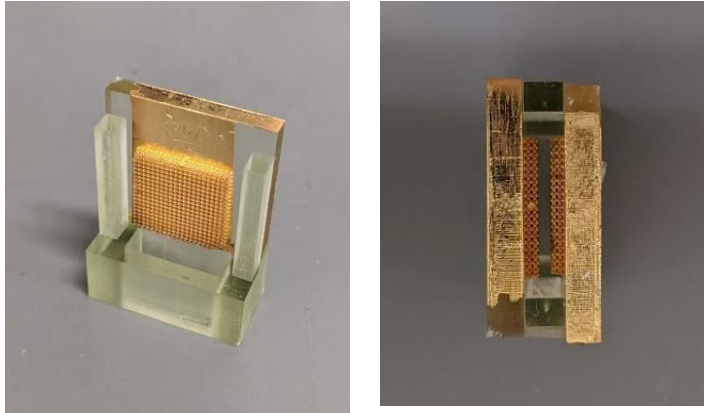


図3 スーパーキャパシタ構造

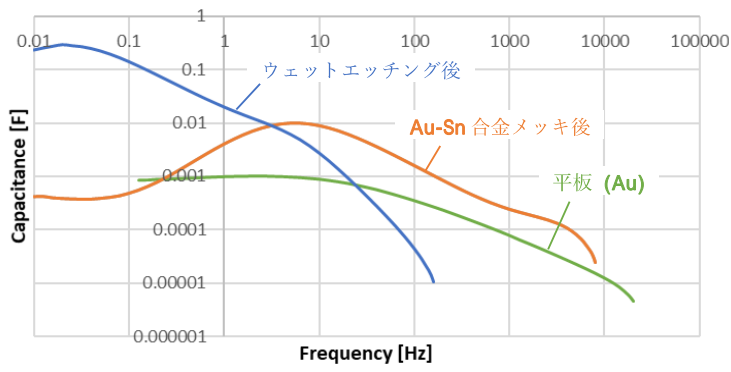


図4 EIS 特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

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

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
---------	---------