

# 広域誘電泳動集積によるスピンゼーベック発電素子の開発

稲葉 優文\*

## Development of Spin Seebeck Power Generation Devices by Wide-area Dielectrophoretic Integration

Masafumi INABA\*

We attempted to develop a technique to form homogeneous particulate films by generating dielectrophoretic forces over a wide area, which are driving forces due to unequal electric fields. Finite element simulations predicted periodic formation of dielectrophoretic fields on periodic nanostructures. We tried to accumulate nanodiamonds with a diameter of about 50 nm on the deposited gold nanoislands, but although some accumulation was observed, quality name accumulation could not be confirmed over a wide area.

### 1. 背景

ナノ・マイクロサイズの微粒子の操作は、高度なナノ構造の形成、ナノレベルでの反応場の形成、生体分子の観測・計測などの多岐にわたる領域で重要な基礎技術である。誘電泳動力は、誘電率の異なる溶媒と微粒子に不平等電界が印加されるとき、分極の偏りによってクーロン力が働くことにより発生する駆動力である。誘電泳動では、溶媒に分散・懸濁した微粒子を集積するため、希少・高価なサンプルにも適用しやすく、基板に容易に吸着しにくい半導体微粒子であっても電界の条件等を調整することで必要なときに必要な微粒子を選択的に、必要な量だけ集積させることができる。さらに、誘電泳動中のインピーダンスをモニタリングすることでリアルタイムに集積状況を知ることができるメリットがある。しかし、電界は電極のエッジに集中するため、誘電泳動力は電極エッジに集中して発生し、集積された微粒子による誘電泳動力によりそこを起点に集積が進行する。従って、誘電泳動集積するための電極間距離は必然的にマイクロメートル程度に制限されていた。

翻って、微粒子を広域に堆積することは通常スピコート法やインクジェット法などで実現されてきたものの、微粒子の懸濁液の蒸発の際に微粒子が大きなクラスターを形成して均質な膜形成ができない場合があった。溶媒の揮発によるクラスター化を抑止するには、基板の表面エネルギーを制御して微粒子の表面吸着料を向上し、液体表面張力を上回らせることが重要であるが、材料ごと、要求膜厚ごとに統一した技術はなく適用のハードルが高い。誘電泳動力をより広域に発生させることができれば、様々な微粒子を簡便に、より広域に、均質に集積・操作しリアルタイムで評価するためのプラットフォームを構築可能である。

温度差を利用した熱電変換素子を電源とする無給電センシング素子は、安全管理を長期間安定して行う用途に重要である。従来型の熱電変換素子はバルクの半導体を用いるため、素子が比較的大型化する。一方、電子スピンを利用したスピンゼーベック発電を利用した素子は磁性体の薄膜を用いるためにフレキシブルな薄型素子に成型可能であり、小型化可能である。しかし、スピンゼーベック発電による素子は現状では発電効率が悪く、従来型に及ばない。誘電泳動集積による広域な薄膜形成を、スピンゼーベック発電素子に応用すれば、発電効率を増大させることが可能である。

そこで本研究の目的を、広い領域への均質な誘電泳動集積を用いた酸化鉄スピンゼーベック発電素子の開発とした。不平等電界によって生じる誘電泳動場を広域に、均質に制御する均質誘電泳動法の技術基盤を構築し、これをスピンゼーベック発電素子の開発に応用する。

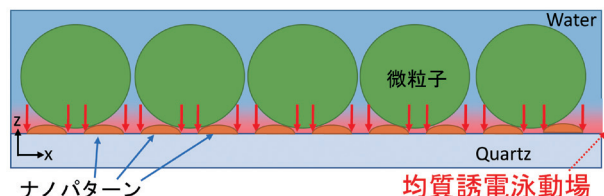


図1 ナノパターンにより形成される誘電泳動場と、集積する微粒子の模式図。

2023年2月28日 受理

\* 豊田理研スカラー

九州大学大学院システム情報科学研究院電気システム工学部門

## 2. シミュレーションによる誘電泳動集積の検討

誘電泳動場を広域に形成するために、ナノパターンニングの一つとして短時間の蒸着によるナノアイランドを用いることを考えた。ナノアイランドは、互いに接触しない直径数 nm オーダーのもので、電位は互いに浮いている状態である。これに溶媒中で電界を印加した際、ナノアイランド端部に小さい誘電泳動場が形成され、微粒子は均質な誘電泳動場を感じる(図 1)。これを検証するために、COMSOL Multiphysics を用いた有限要素シミュレーションを行った。誘電泳動力  $F_{DEP}$  は以下の式で記述される。

$$F_{DEP} = 2\pi r^3 \epsilon_m \text{Re}[K(\omega)] \nabla E^2 \quad (式 1)$$

ここで、 $r$ : 粒子半径、 $K(\omega)$ : Clausius-Mossotti 係数、 $\omega$ : 電界の角周波数、 $E$ : 電界である。式 1 から、誘電泳動力は  $\nabla E^2$  に比例しており、これを誘電泳動場と呼ぶことにする。誘電泳動場は、5  $\mu\text{m}$  の電極間にナノアイランドをおいた場合、図 2(a) のように分布する。カラーバーは誘電泳動場の大きさを表している。電極中央部のナノアイランド領域においては図 2(b) のように、周期的に誘電泳動場が形成される。このとき、ナノアイランドサイズを変えたときの誘電泳動場の高さを図 3 に示す。粒子に誘電泳動力が働きしきい値として誘電泳動場の大きさが  $10^{17} \text{V}^2/\text{m}^3$  のとき、直径 10 nm のナノアイランドに対して高さ 15 nm 程度の領域に粒子が入れば、粒子は誘電泳動力を感じるようになる。

## 3. ナノアイランドによる誘電泳動集積

10 nm 程度の微粒子の集積を検討するため、微粒子にナノダイヤモンドを用い、蛍光観察することで集積状況を評価することを試みた。ダイヤモンドは、すでに誘電泳動特性が明らか<sup>(1)</sup>な物質であり、集積に適当な溶媒濃度、印加周波数を選択可能である。図 4 に、(a)電極間距離 100  $\mu\text{m}$  に堆積した金ナノアイランドと、(b)その上に直径 50 nm 程度のナノダイヤモンドを集積した際の SEM 像を示す。金ナノアイランド状に、まばらにナノアイランドがクラスターのような形で堆積しているのがわかる。金ナノアイランド以外の領域では堆積密度が低かったことから、ナノアイランドによる誘電泳動力を受けてナノダイヤモンドが集積したものと考えられる。しかし、ナノアイランド上全体に微粒子を集積することはできなかった。これは、電極間距離が大きかったために誘電泳動力が小さくなり集積できなかった、集積する微粒子がナノアイランドのサイズに比して大きすぎた等の原因が考えられる。今後条件最適化を図る必要がある。

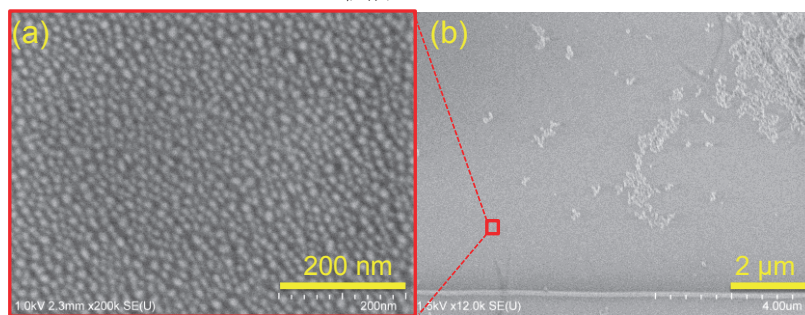


図 4 (a) ナノアイランドと (b) ナノアイランド上に集積されたナノダイヤモンドの SEM 像。

## 4. まとめ

不平等電界による駆動力である誘電泳動力を広域で発生させ、均質な微粒子膜を形成する技術を開発することを試みた。有限要素シミュレーションにより、周期的なナノ構造上に誘電泳動場が周期的に形成することが予想された。堆積した金ナノアイランド上に直径 50 nm 程度のナノダイヤモンドの集積を試みたが、一部に集積が見られるものの、広域で均質な集積は確認できなかった。今後、今後条件最適化を図り、スピンゼーバック素子の開発につなげたい。

## REFERENCE

1) M. Inaba, S. Hayashi, H. Li, M. Kamimura, M. Nakano and J. Suehiro, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59** (2020) 046502.

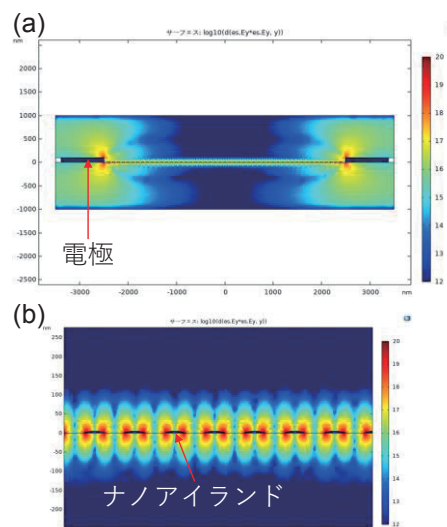


図 2 ナノアイランドに形成される誘電泳動場 (a) 電極間全体、(b) ナノアイランド部。

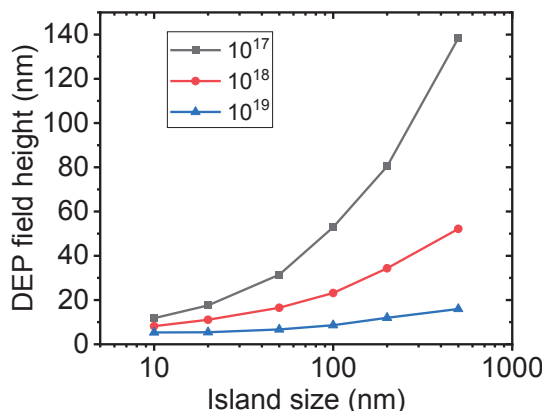


図 3 誘電泳動場の高さのナノアイランドサイズの大きさ依存性。