M-9

静電気力顕微鏡における空間分解能向上のためのセンサ先端部の先鋭化

Sharpening a sensor tip of electrostatic force microscopy for improvement of its spatial resolution

○鈴木 学[1], 芦澤 好人[2], 東尾 順平[3], 上原 利夫[3], 塚本　新[2], 中川 活二[2]
Manabu Suzuki[1], Yoshito Ashizawa[2], Jumpei Higashio[3], Toshio Uehara[3], Arata Tsukamoto[2], Katsuji Nakagawa[2]

To improve spatial resolution of electrostatic force microscopy (EFM), its sensor tip was sharpened for evaluation of charge distribution of small electret electrode. Electrical field analysis that normalized spatial frequency, which ratio of sensor width to electrode width is independent of sensor width this fact means small sensor tip shows higher spatial resolution. Focused ion bean was used for microfabrication of the sensor tip of the EFM. The narrowest sensor tip width was 0.64 µm, which is less than 1 µm.

1. 研究背景

近年，低消費電力デバイスのための電源として，微小な振動エネルギーを用いて発電を行う環境振動発電が注目されている．環境振動発電では，電極を数 Hz～数百 Hz の低周波数で振動することにより，微小な電気的エネルギーを取り出すことが可能であり，小体積において発電性能が優れている．特にエレクトレットを用いた静電誘導型の環境振動発電が注目されている[1].

エレクトレットは誘電体に電荷を固定したものであり，半永久的な静電場を形成する．エレクトレット発電では帯電したエレクトレットと対向電極を相対運動することにより，対向電極上の誘導電荷量を変化し，交流電流を発生することにより電気的エネルギーをとりだす (Fig. 1). より多くの発電量を出すためには，エレクトレット上に均質に帯電することが重要であるため，エレクトレットの保持する電荷分布の評価が必要である[1][2]. しかしエレクトレットは数百 V 以上の高電位，かつ数 µm オーダーのエレクトレット電極にて測定が要求されるため，通常の測定器では電荷分布の評価が困難である．一方，我々が研究･開発を行っている静電気力顕微鏡 (Electrostatic Force Microscopy: EFM) は大気中で，1 kV 以上の電位を 10 µm 程度の空間分解能で計測が可能である．そこでエレクトレット表面電位分布の評価を行うため，EFM の空間分解能の向上を検討した.

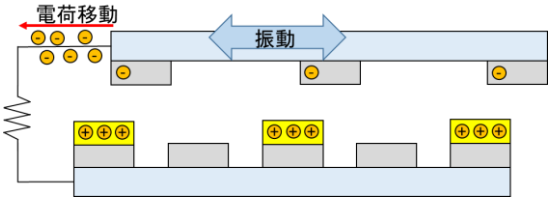

Fig. 1 Schematic view of vibration generator using electret electrode

2. EFM の空間分解能向上について

EFM はカンチレバーに直流電圧V_{DC}，交流電圧V_{AC}を印加し，カンチレバーのディテクターを試料に近づけ静電気力によるカンチレバーのたわみ量を光てこ法にて検出し，測定試料の表面電位を測定する. EFM の空間分解能はセンサ先端形状に強く依存する[3]. Fig. 2 のに実際の EFM のセンサ形状を示す. センサは, 底辺 150 µm, 高さ 450 µm, 厚さ 5 µm の二等辺三角形状をしている．このセンサ先端部に静電気力を受け表面電位の測定を行う．このとき，センサ先端のみ静電気力を受ける状態が理想的な状態であるが，センサのテーパー部にも静電気量を受けてしまうため，センサの空間分解能が悪くなる．そこで先端部を集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam)を用いて削ることで，先端部の先鋭化を行い，空間分解能の向上を行った.

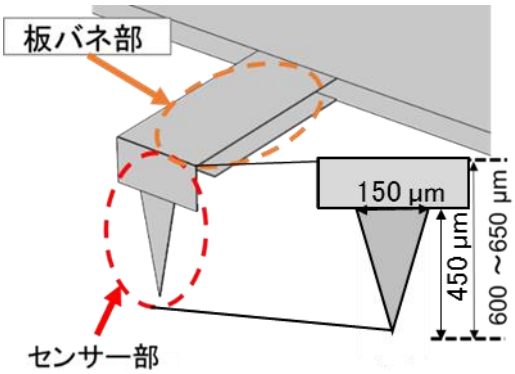

Fig. 2 Schematic view of a sensor for electrostatic force microscopy

3. センサ先鋭化の空間分解能向上

3.1 シミュレーション用いた空間分解能向上検討

シミュレーションを用いてセンサを先鋭化することによる，空間分解能の向上を検討した．Fig. 3にシミュレーションのセンサモデル

1:日大理工・院(前)・電子　2:日大理工・教員・電子　3:トレック･ジャパン株式会社

を示す．5 Vと0 Vを印加した電極幅Wの櫛形電極上にセンサー試料間距離d 離して高さ650 μmのセンサを配置した．センサ幅S は1 μm及び5 μmとし，センサ試料間距離$d = S$ とした．

このときの電極幅W と各センサ幅S の比率から規格化空間周波数S/W とした．このときの各センサの最大検出電位を用いて空間分解能の比較を行った．Table 1に各センサ幅の電極幅と正規化した値をまとめ，このときの結果をFig. 4示す．これよりセンサ幅S に依らず規格化空間周波数の傾向が一致した．また傾向が一致したことにより，センサ幅が狭いほうが，微小領域の電位検出が可能であり空間分解能が向上すると考えられる．

3.2　FIB を用いたセンサ先鋭化加工

数 μm オーダーの微小エレクトレット電極を測定するには，センサ先端幅を 1 μm 以下まで細くする必要がある．そこで FIB を用いて根本から加工設定幅を(a) 2 μm，(b) 1 μm，(c) 0.8 μm，(d) 0.5 μm の 4 段の階段形状のセンサの作製を行った．加工条件として加工時間を減らすため，加速電圧 40 kV，アパーチャー径 300 μm，コンデンサレンズ有りにて縦 20 μm × 横 2 μm の粗削り加工を行った．その後加速電圧 40 kV，アパーチャー径 80 μm，コンデンサレンズ有りにて，階段形状の微細加工を行った．

3.3　FIB 加工結果

Fig. 5 センサ先端加工設定のモデル図と加工後の位置(c), (d)の SEM 画像を示す．また各幅の設計値と加工値を Table 2 にまとめた．設計値が大きいと誤差率が小さいが，設計値が小さくなるにつれて誤差率が大きくなった.また最小幅 0.64 μm までの加工に成功した．

4. まとめ

EFM を用いてエレクトレットの電荷分布の評価を行うため，EFM のセンサ先鋭化加工を行い，空間分解能向上を行った．シミュレーション結果よりセンサ幅を細くすることにより空間分解能の向上が確認できたため，FIB を用いてセンサの先鋭化加工を行った.今後加工したセンサを用いて電位測定を行い，空間分解能の評価を行う．

謝辞

本研究は，JST, CREST 「高出力環境発電のための革新的エレクトレット材料の創成」の支援を受けた．

参考文献

[1] 鈴木雄二: 環境振動発電技術の原理と将来展望 (エネルギー変換 (3-14)), 日本エネルギー学会 93(3), 227-233, 2014-03-20.

[2] 鈴木雄二: エレクトレットを用いた静電誘導型 MEMS 発電器, 日本 AEM 学会誌, 22 巻, pp. 361-367, (2014).

[3] 上原利夫，松丸剛士，東尾順平，大垣内一雄，中川活二，伊藤彰義: 静電気力顕微鏡における表面電位法, 静電気学会春季講演会, 2p-4，49-52，(2003).

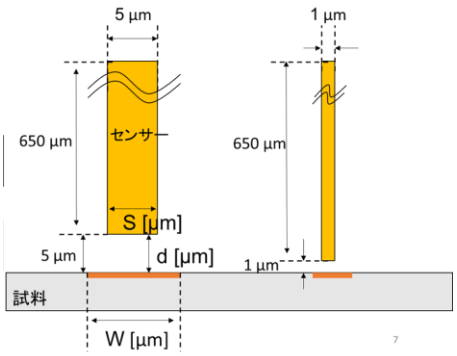

Fig. 3　Simulation model

Table 1 Normalized spatial frequency by sensor width S divided electrode width W

S =5 μm				
W 〔μm〕	10	20	30	40
規格化空間周波数S/W	0.5	0.25	0.166	0.125
S =1 μm				
W 〔μm〕	2	4	6	8
規格化空間周波数S/W	0.5	0.25	0.166	0.125

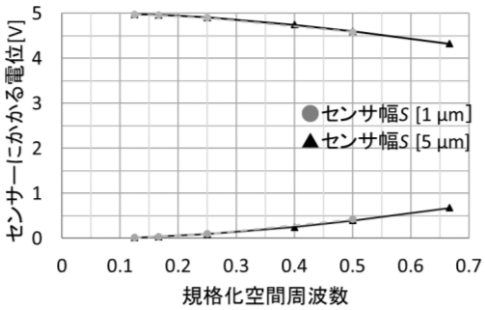

Fig. 4 Calculated sensor electric potential as a function of normalized spatial frequency

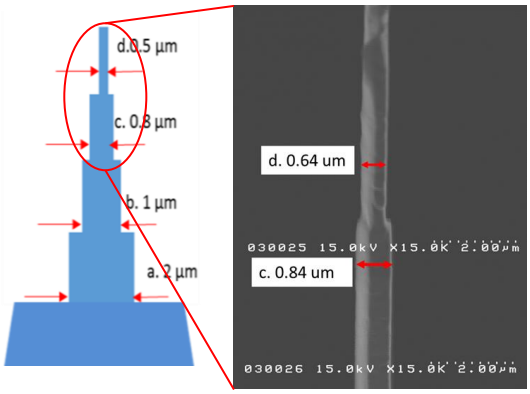

Fig. 5　SEM image of a sharpened sensor tip

Table 2 Designed and processed size of the sensor tip

位置	設定値 (μm)	測定値 (μm)	誤差率 (%)
a	2	1.97	1.5
b	1	1.07	7
c	0.8	0.85	6.25
d	0.5	0.64	28