

AFM リソグラフィを用いたナノ 3D プリンター技術の開発

電子技術課 横山義之* 角田龍則

1. はじめに

近年、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy, AFM) の低価格化や大幅な高速化が進んだことで、AFM の細かい探針 (プローブ) を自由に操作して行うナノ加工「AFM リソグラフィ」が注目を集めている。通常の切削加工や積層造形法 (3D プリンティング) では、ナノスケールの加工を行うことは難しい。また、電子線 (EB) や集束イオンビーム (FIB) を用いる加工法では、簡便な大気中での加工が行えない。AFM リソグラフィは、細かい尖ったプローブ (先端径: 数十 nm 以下) をピエゾ駆動により XYZ 方向に精度よく動かすことができ、大気中でのナノ加工が容易に行える新しい手法として期待されている。

これまで、AFM リソグラフィを用いて、原子を 1 個レベルで配置させた例やシリコンのような構造体にナノスケールの溝を掘った例などが報告されている。本研究では、機能を持った材料 (低温焼結によって導電性を示す金属ナノ粒子や、温度によって体積を大きく変化するゲルアクチュエーター材料など) に対しての AFM リソグラフィによる 2 次元もしくは 3 次元の直接ナノパターンニングを目指している。

今年度は、AFM リソグラフィを用いて成形する材料に、金属配線形成用として、金属ナノ粒子を選定し、その特性調査を行った。また、金属ナノ粒子の塗膜に、AFM プローブを強く押し込むことで、2 次元的なナノパターンを形成することを試みた。

2. 金属ナノ粒子について

金属ナノ粒子インクは、平均粒径が数 nm の金属ナノ粒子を溶剤中に均一に分散させたものである。個々の金属ナノ粒子は、凝集を防ぐために有機分子からなるコーティング剤で取り囲まれており、溶剤を蒸発させて得られる塗膜は、そのままでは導電性を示さない。加熱によってコーティング剤を燃焼・脱離させ、さらに、金属ナノ粒子同士を融着させる焼結プロセスを行うことによって導電性が発現し、金属薄膜・配線として使用できるようになる。この時、ナノサイズ化された金属粒子は比表面積が大きく、高い表面エネルギーを有しているため、バルクの融点よりもはるかに低い温度で粒子同士の融着が生じる。そのため、有機分子からなるコーティング剤の燃焼・脱離に必要な比較的低温の加熱の際に、金属ナ

ノ粒子同士の融着も同時に進行する。

本研究では、金属ナノ粒子インクとして、平均粒径 10nm および 3nm の Ag ナノ粒子を溶剤中 (テトラデカン) に分散させた Ag ナノメタルインク (アルバック製) を用いた検討を行った (図 1)。熱重量分析 (TG-DTA) により、平均粒径 10nm の Ag ナノ粒子では 230°C 付近、平均粒径 3nm の Ag ナノ粒子では 150°C 付近でコーティング剤の燃焼・脱離が発生することを確認した。また、それに伴って生じる Ag ナノ粒子同士の融着は X 線回折装置 (XRD) を用いて、導電性の発現は電気抵抗率測定 (4 端針法) を用いて、それぞれ確認した。

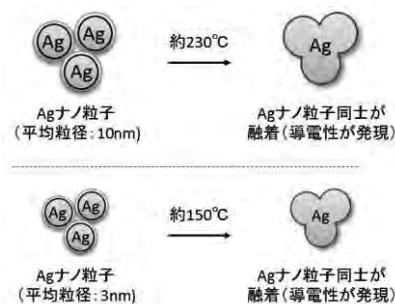


図 1. Ag ナノ粒子 (10nm、3nm) の焼結イメージ

3. AFM リソグラフィ

平均粒径 10nm および 3nm の Ag ナノ粒子インクを、スピコートによりシリコン基板上に塗布した。100°C、2 分間のベークを行い、溶剤を揮発させて得られる塗膜を AFM (Dimension Icon、ブルカー-AXS 製) を用いて、タッピングモードにて観察した (図 2)。塗膜の表面粗さ (算術平均粗さ: Ra) は、平均粒径 10nm のものでは 1.4nm、平均粒径 3nm のものでは 0.8nm であり、どちらも AFM リソグラフィを行うには十分な平坦で均一な塗膜が得られていることがわかった。

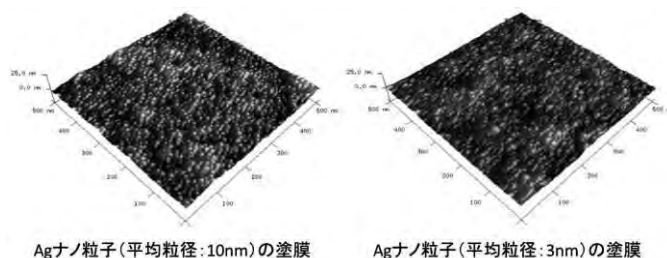


図 2. Ag ナノ粒子 (10nm、3nm) の塗膜の AFM イメージ (観察範囲: 500nm × 500nm)

*現 商工企画課

次に、平均粒径 10nm の Ag ナノ粒子の塗膜に対して、AFM プロブを強く押し当て、2 次元的なナノパターン形成を試みた (図 3)。用いた AFM プロブは、先端径 8nm のシリコン素材のものである。形成手順は、まず、AFM のタッピングモードで膜表面を観察した後、コンタクトモードに切り替え、任意の領域においてプロブを強く押し当てた (スクラッチ)。最後に、再びタッピングモードに戻して、形成したナノパターンの形状観察を行った。プロブを強く押し当てた領域では、Ag ナノ粒子が周囲に押し出されて凹んだ形状となり、下地のシリコン基板が表面に露出していた。この手法により、線幅 100nm 程度の Ag ナノ粒子の溝パターンは容易に形成できることがわかった。

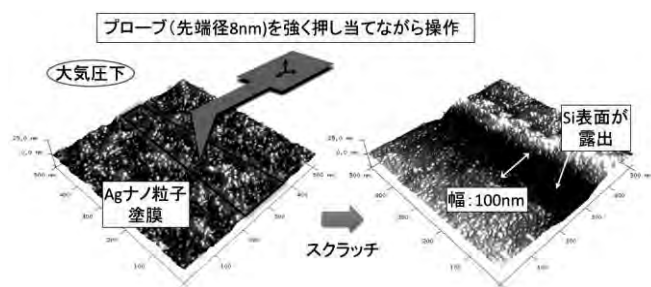


図 3. Ag ナノ粒子(平均粒径: 10nm)の塗膜に対する AFM リソグラフィー(観察範囲: 500nm × 500nm)

4. Ag ナノ粒子の焼結

平均粒径 10nm の Ag ナノ粒子の塗膜に、AFM プロブを強く押し当て形成したナノパターンに対して、焼結プロセスを行い、導電性の発現を試みた (図 4)。しかし、焼結を進めていくにつれて、Ag ナノ粒子は凝集塊を形成し、100nm 程度の微細なナノパターンは消失してしまう

ことがわかった。この凝集塊の形成に関しては、焼結の際の昇温速度をより遅くしても、また、窒素雰囲気下で行っても、特に大きな改善は見られなかった。これを解決する手段としては、AFM プロブ自体を加熱し、ナノパターンを形成したい領域のみで選択的加熱を行って Ag ナノ粒子同士の焼結を起こさせる手法が有効であると考えられる。今後の検討課題として取り組んでいく予定である。

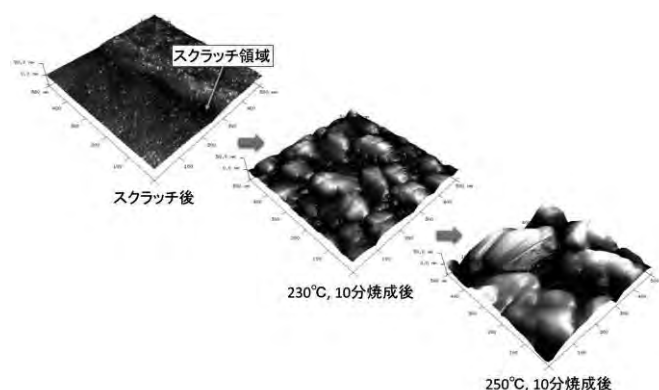


図 4. Ag ナノ粒子(平均粒径: 10nm)の塗膜に形成したナノパターンに対する焼結プロセスの結果 (観察範囲: 500nm × 500nm)

5. まとめ

AFM リソグラフィーを用いた微細加工技術により、将来、大気中や小さなクリーン環境内での迅速・安価なナノデバイスの試作が可能になると期待される。また、種々の機能材料 (金属配線材料、絶縁材料、光学材料、ゲルアクチュエーター材料、再生医療用の細胞培養足場材など) を AFM リソグラフィーにより直接、微細加工できるようになれば、ナノ配線・ナノアクチュエーターから構成される高機能なデバイス、細胞の立体組織化技術などの開発も可能になるとと思われる。

キーワード: 微細加工, 原子間力顕微鏡, 金属ナノ粒子

Development of Nano 3D printing technology using AFM lithography

Yoshiyuki YOKOYAMA, Tatsunori KAKUDA (Toyama Industrial Technology Center)

Recently, the price of Atomic Force Microscopy (AFM) generally has got lowered while the measurement speed of AFM has significantly accelerated. As a result, the micro-fabrication method “AFM lithography” that utilizes thin probe attached with the AFM is now attracting attentions. In this research, I will consider “Nano 3D printing technology” using this “AFM lithography” to process various functional materials directly, two-dimensionally, and three-dimensionally. This year, I have designed and explored various functional materials that can be directly processed with “Nano 3D printing technology”. From now on, it is expected that experimental manufacturing of Nano-devices in a shorter period with lower costs will be feasible with “Nano 3D printing technology”.