

イノベ 見て歩き

連載：第4回

究極に薄いナノシートやデバイスを開発 豊かな社会構築、省資源・省エネに寄与

長田 実

Osada Minoru

名古屋大学 未来材料・システム研究所 教授

2020年～23年 A-STEP 研究責任者

社会実装を目指す研究開発の現場を訪ねる「イノベ見て歩き」。第4回は、究極な薄さのナノシートや高速薄膜作製法、革新的誘電材料・デバイスなどの、省資源・省エネルギーに寄与する研究開発に取り組む名古屋大学未来材料・システム研究所の長田実教授を紹介する。

世の中の役に立つ材料創生 新しいプロセスを架け橋に

名古屋大学の未来材料・システム研究所は、先端的な材料・デバイスの要素技術からシステム技術までの研究開発を通じて、環境調和型および持続発展可能な社会の実現に寄与することを目的とした科学研究所である。名古屋大学における最大規模の部局横断型融合研究推進組織であり、新学問領域の創生と新しい学術体系の構築を目指している。

この研究所で2018年から「ナノシート」の研究開発に取り組んでいるのが、長田実教授だ。ナノシートとは、厚さが原子数個程度で、約1ナノ（10億分の1）メートル、横サイズが厚さの数千倍～数万倍の大きさを持つシート状の物質である。構成する原子の種類や構造にもよるが、高速電子伝導や高誘導性、触媒活性などの優れた機能を持つことから、機能的な薄膜の応用が進められている。

長田さんは、A-STEP「ナノシート技術を用いた革新的誘電材料・デバイスの開発」で、素材・プロセス・デバイスの3つの研究テーマに挑んだ。具体的には、極薄ナノシートの合成、高速薄膜作製法の開発、誘電体キャパシタの開発だ。「世の中の役に立つ材料を創生するためには、新しいプロセスを架け橋に、機能的なデバイス

を作ることが最終ゴールであるべきだと思っています」と長田さんは素材からデバイス開発までをトータルで考えることの重要性を強調する。

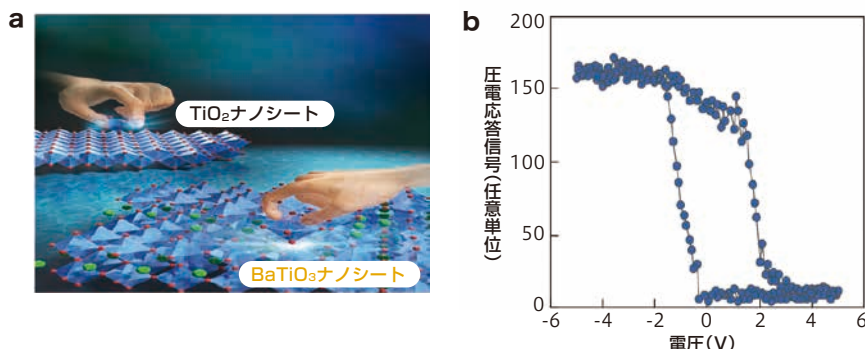
低温下でナノシート合成 強誘電性の維持を確認

ナノシートの開発では、薄く、電気を蓄える性質である「強誘電性」を持つ酸化物ナノシートの合成を目指した。電子部品などに使うナノシートでは、多くの電気をため込める強誘電性が不可欠だが、従来の材料では薄くすると強誘電性が消失する「サイズ効果」が起きてしまう。さらに、今回用いたチタン酸バリウム(BaTiO_3)は構造上、剥離・合成する従来の方法が使えないため、新たな合成方法の開発が必要だった。

そこで長田さんは、ナノシートの高い反応性に着目した。厚さ1ナノメートルの酸化チタン(TiO_2)ナノシートを使い、表面反応により BaTiO_3 への構造変化を起こす鑄型合成法を検討。水・エタノールの混合溶液中で、 TiO_2 ナノシートと水酸化バリウムを反応させることで BaTiO_3 ナノシートを合成した。また、強誘電性は厚さ1.8ナノメートルまで維持され、1.4ナノメートルでは消えることも確認した(図1)。

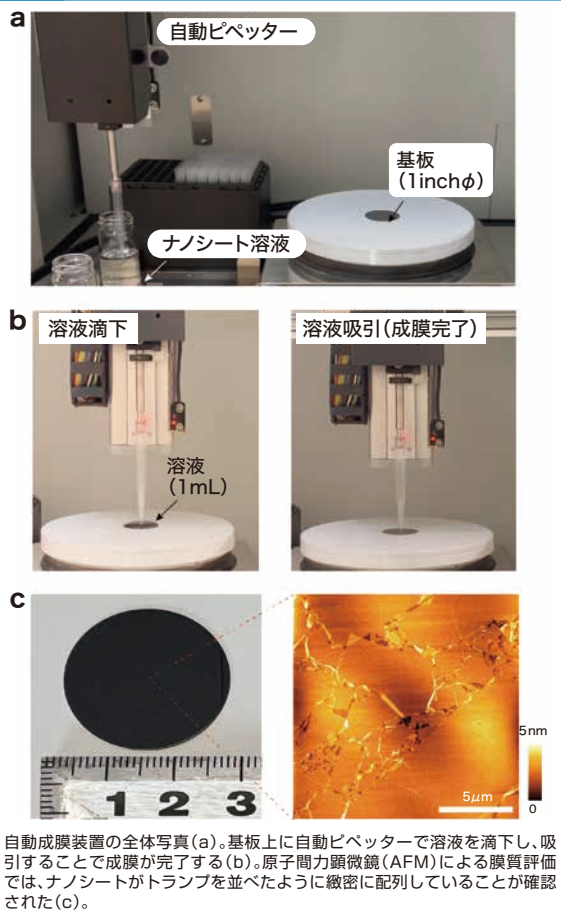
通常、 BaTiO_3 の合成では1000度以上の焼成を必要とする。一方で今回の合成温度は、なんと60度の低温下だった。「今回の方法はより低い温度で合成できることはわかっていましたが、まさかここまで低いとは思っていませんでした。そのため、なかなかその先入観を排することが

図1 BaTiO_3 ナノシートの合成と強誘電性



BaTiO_3 ナノシート合成のイメージ図(a)。圧電応答測定によるナノシート1枚での強誘電性評価(b)。単位格子3個分に相当する厚さ1.8ナノメートルのナノシートでは、強誘電性特有の圧電応答カーブが観測された。

図2 2次元ナノシートの高速・液相成膜



できず、試行錯誤を重ねることになりました」と長田さんは当時の苦労を振り返る。

まさに、コロンブスの卵 自動成膜法の確立に成功

ナノシートのプロセス開発で目指したのは、成膜の高速化・大面積化である。一般的にナノシートの成膜では、ナノシートのコロイド水溶液を浅いトレイに展開し、気液界面に広がったシートを集積して薄膜を作製するラングミュア・プロジェクト法などが用いられている。しかし、熟練した操作や複雑な条件設定、大量の溶液が必要な上に、1層の成膜に1時間程度かかることが工業化への大きなネックとなっていた。

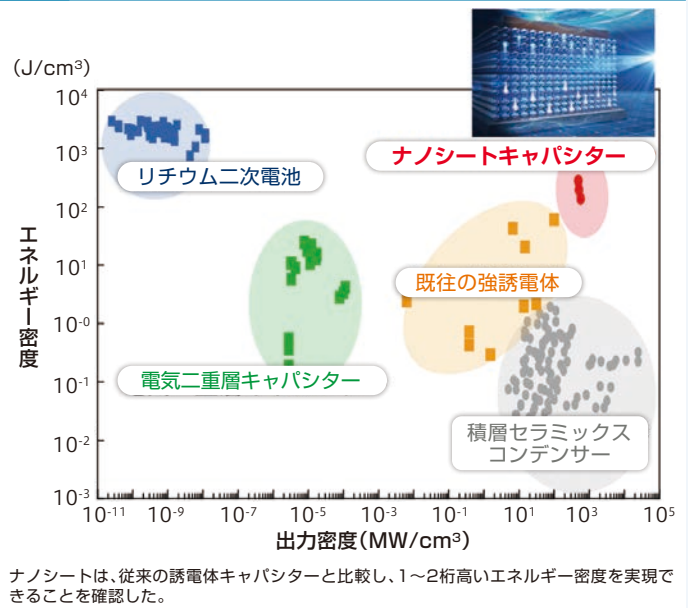
一方でコロイド水溶液を滴下し、乾燥させるドロップキャスト法では、不均一な膜ができてしまう。そこ

で別の方法を模索している時に、偶然解決法が生まれたという。「ある学生が『溶液がもったいない』と滴下後すぐに溶液をピペットで吸引したのです。すると、数秒できれいな2次元構造の膜ができました。まさに、コロンブスの卵です」と長田さんは説明する。直ちにこの現象を観察・解析し、それらの結果を基にロボットによる滴下・吸引の自動化の確立に成功した(図2)。この自動成膜法は、JSTの新技术説明会での反響も大きく、企業との共同研究の話も届いているという。

世界最高のエネルギー密度 誘電体キャパシターで実現

A-STEPの最終ゴールは、新たな蓄電デバイスとして注目されている「誘電体キャパシター」の開発である。このキャパシターは、たった数秒で充電できるだけでなく、安全で長寿命、高出力密度などの優れた特性を持つ。「究極の蓄電デバイス」として期待される一方で、本質的な問題点を抱えている。それは、一度に多く

図3 ナノシートキャパシターの構造と各種蓄電デバイスとの特性比較



のエネルギーを蓄積できないことだ。

ナノシートをベースとする誘電体キャパシターの研究を進めていた長田さんは、1.5~3ナノメートルと分子レベルの厚さで高い誘電性と絶縁性を兼ね備えたナノシートを開発し、誘電体キャパシターで世界最高のエネルギー密度となる1立方センチメートル当たり174~272ジュールを実現した。これは、従来の誘電体材料の約10倍に相当し、リチウム二次電池にも匹敵する(図3)。また、300度の高温でも安定性を保つことを確認した。将来的には、電気自動車のパワーブースターなどの全固体蓄電デバイスへの応用が見込まれている。

ナノ技術は、物質の機能や特性を大幅に向上させ、豊かな社会を構築するだけでなく、デバイスを作る際にも非常に少ない材料ですむため、省資源・省エネルギーにも大きく寄与する。「だからこそ、資源がほとんどない日本にとって非常に重要な技術です。その意味でも、社会に新たな価値をもたらす、夢のある技術だと思っています」と長田さんは笑顔で語る。

(TEXT:横井まなみ、PHOTO:伊藤彰浩)