



世界最高性能の薄膜コンデンサ素子を開発

— ナノの高誘電体シートで素子の小型化と大容量化を同時実現 —

平成22年8月24日

独立行政法人物質・材料研究機構

独立行政法人科学技術振興機構

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田資勝）国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（拠点長：青野正和）の長田 実 MANA研究者、佐々木高義 主任研究者らの研究グループは、分子レベルの薄さ（厚み：1.5ナノメートル）の新しい高誘電体¹⁾シートを発見し、ビーカーを使ったナノテクで世界最高性能の薄膜コンデンサ²⁾素子の作製に成功した。
2. コンデンサは、電圧をかけると、その電圧に応じて電荷を蓄える機能を持った電子部品で、携帯電話、パソコンなど、あらゆる電子機器の心臓部で活躍している。近年の携帯電話、パソコンの小型化、高機能化に伴い、コンデンサの需要も急速に伸びており、小型で大容量、高機能のコンデンサの開発が重要となっている。現在、コンデンサには、チタン酸バリウム³⁾などの高誘電体セラミックスから作製した誘電体膜が使われており、誘電体膜を薄膜化することで、素子の小型化、高性能化（大容量化）を実現してきた。しかし、現在の高誘電体膜には、製造プロセスの加工限界や、ナノサイズに薄膜化すると、誘電率が低下するという動作限界の問題があり、これがさらなる小型化、高性能化を目指す上で大きな障害となっていた。
3. 本研究グループでは、小型、高性能のコンデンサ素子を実現する新しい手法として、ナノレベルでも機能する高誘電体の探索を行い、今回、従来の高誘電体膜の加工限界や動作限界を打ち破る、膜厚10ナノメートル以下で機能する極薄の高誘電体シート（ペロブスカイトナノシート⁴⁾）を発見した。さらに、環境にやさしい水溶液プロセスを用いて、ナノシートの積み木細工を行い、膜厚10ナノメートル以下で世界最高の誘電率（200以上）を持つ薄膜コンデンサ素子の作製に成功した。これにより、コンデンサ素子のさらなる小型化と大容量化が可能となり、次世代の大容量コンデンサ素子開発への新しい道が開けた。
4. 本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業チーム型研究（CREST）「ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成」研究領域（研究総括：堀池靖浩）における研究課題「無機ナノシートを用いた次世代エレクトロニクス用ナノ材料／製造プロセスの開発」（研究代表者：佐々木高義）の一環として行われたもので、ACS NANO誌（米国化学会発行）のオンライン速報版に近日中に掲載される予定である。

研究の背景

私たちの身の回りには携帯電話、パソコンなどの電子機器には、誘電体から作られた電子部品が数多く使われている。その中の重要な部品の1つにコンデンサがある。コンデンサは、電圧をかけると、その電圧に応じて電荷を蓄える機能を持った電子部品で、電源の安定や回路の保護の役目をするバックアップ回路や、電源回路のノイズを取り除き、必要な信号だけを取り出すカップリング素子、フィルターなどに使われている。私たちが普段使っているモバイル機器はまさにコンデンサの塊とも呼べるもので、携帯電話には1台あたり約300個、パソコンで約600個のコンデンサが使われている。私たちの携帯電話、パソコンが年々、小さく軽くなり、また高機能になっているのも、このコンデンサの小型化、高性能化の賜物である。

現在のコンデンサの主流は、チタン酸バリウム (BaTiO_3) などの高誘電体を使った積層セラミックコンデンサであり、チタン酸バリウムの誘電体膜と電極膜を交互に1000層程度重ねた多層素子である(図1左)。これまでの積層セラミックコンデンサの小型化、高性能化(大容量化)は、誘電体膜を薄膜化することで実現しており、最先端の素子では、粒径100~300nmのチタン酸バリウム微粒子から作製した膜厚1 μm 程度の誘電体膜が使われている。コンデンサのさらなる高性能化には、誘電体膜のさらなる薄膜化が不可欠であるが、現行のセラミックプロセスでは、微粒子の微細加工の問題があり、誘電体膜のさらなる薄膜化が困難になっている。

これを克服する方法として、物理蒸着などの薄膜プロセスにより、チタン酸バリウム系薄膜 ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ など) を作製し、大容量の薄膜コンデンサの開発を目指す研究も盛んに行われている。しかし、チタン酸バリウム系薄膜は、膜厚を100nmレベルまで小さくすると、誘電率が低下するという問題があり、膜厚100nm程度が素子として安定に動作する限界であった。近年の携帯電話、パソコンの高機能化に伴い、搭載する電子部品数の増加や、機器の小型化によるスペース問題で、小型で高性能のコンデンサのニーズは世界的に高まっている。特に、次世代の大容量コンデンサ素子の開発のためには、素子のさらなる小型化、大容量化を同時に実現する新しい高誘電体材料の開発が必要となっている。

研究成果の内容

本研究グループでは、従来の高誘電体材料の問題点を克服し、コンデンサ素子のさらなる小型化、大容量化を同時に実現する新しい手法として、ナノレベルでも機能する高誘電体の開発を目指して研究を行い、今回、従来の高誘電体膜の加工限界や薄膜での動作限界を打ち破る、膜厚10nm以下で機能する極薄の高誘電体シート(ペロブスカイトナノシート)を発見した(図1右下)。

図2は、今回発見したペロブスカイトナノシートと従来の高誘電体であるチタン酸バリウムの結晶構造の単位ユニットを比較したものである。今回のペロブスカイトナノシートは、チタン酸バリウムと類似した結晶構造を持つ材料で、ニオブ-酸素八面体 (NbO_6) が3個積層した層状ペロブスカイトという構造を有している。チタン酸バリウムをはじめ、この酸素八面体を内包したペロブスカイト構造は広く高誘電体として知られているが、ペロブスカイトナノシートは、ニオブ元素を使って構造を大きく歪ませて、高誘電率化を実現したことが大きな特徴である。さらに、従来チタン酸バリウムは、図2右の単位ユニットが上下左右に100個以上つながった粒径100~300nmの粒子形状の誘電体であるのに対して、今回発見したペロブスカイトナノシートは形状が全く異なる誘電体で、厚み方向が図2左の単位ユニット1個で、

横方向には単位ユニットが1000個以上つながった分子シート状の2次元構造誘電体である。この構造的特徴から、今回発見したペロブスカイトナノシートは「究極の薄さの誘電体」とも呼べるものである。

今回、研究グループは、室温での化学処理により、層状構造を持つ粉体試料($\text{KCa}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$ 、 $\text{KSr}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$)を層1枚までバラバラに剥離し、厚み1.5 nm、横サイズ約 $10\ \mu\text{m}$ のペロブスカイトナノシート($\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$ 、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$)を作製した。さらに、このナノシートは、水に分散したコロイド溶液として得られるため、環境にやさしい水溶液プロセスを用いたナノの積み木細工で、ナノシートを1層ずつ精密に積み重ね、酸化物や白金の電極基板上に高品位の積層薄膜素子を作製した(図3)。

こうして作製した薄膜コンデンサ素子は、優れた誘電特性を有し、膜厚5~20 nmの超薄膜素子で世界最高の誘電率(210~240)を実現した。図4は、ペロブスカイトナノシート薄膜とチタン酸バリウム系薄膜($\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$)における極薄膜領域での誘電特性を比較したものである。従来のチタン酸バリウム系薄膜では、良好な誘電特性を得るために、膜厚100 nm程度が必要となる。逆に、膜厚100 nm以下に薄膜化すると誘電率が劇的に下がり、コンデンサとして安定に動作しない。それに対し、ペロブスカイトナノシート薄膜は、5~20 nmでも200以上の高い誘電率を持ち、5 nmではチタン酸バリウム系薄膜の10倍高い誘電率であった。また、今回作製した素子は、高誘電特性に加え、優れた周波数特性、温度安定性、良好な絶縁特性(リーク電流特性 $10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 以下)など、応用上重要な特性も併せ持っている。以上の特性を利用すれば、従来のチタン酸バリウム系薄膜と比較し、20分の1の小型化と1桁以上の大容量化を同時に実現する高性能の薄膜コンデンサ素子の開発が可能となる。

波及効果と今後の展開

本技術を用いれば、今後一層の小型、高機能化が期待される携帯電話、パソコン等のモバイル電子機器に対して、小型、大容量の薄膜コンデンサ素子やメモリ素子を実現できるため、電子機器のさらなる高機能化や高度情報通信機器をベースとするユビキタス社会の発展にも貢献できるものと考えている。また、今回発見したペロブスカイトナノシートは、極薄ながら優れた絶縁特性を有するため、電子機器の絶縁材料や、半導体素子、有機トランジスタ用のゲート絶縁膜の応用にも好適である。

さらに、本技術は、現行の薄膜プロセスの主流である大型の真空装置や高価な成膜装置を必要としない低コスト、低環境負荷プロセスを実現しており、エネルギー節約や地球環境保護に貢献する次世代のグリーンプロセスとしても重要な役割を果たすことが期待される。

【お問い合わせ先】

<研究内容に関すること>

独立行政法人 物質・材料研究機構

国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 ソフト化学グループ

長田 実 (おさだ みのる)

TEL:029-860-4352 E-mail:osada.minoru@nims.go.jp

<JSTの事業に関すること>

独立行政法人 科学技術振興機構

イノベーション推進本部 研究領域総合運営部

長田 直樹 (ながた なおき)

〒102-0075 東京都千代田区三番町5 三番町ビル

TEL:03-3512-3524 FAX:03-3222-2064 E-mail:crest@jst.go.jp

<報道に関すること>

独立行政法人 物質・材料研究機構 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

TEL:029-859-2026 FAX:029-859-2017

独立行政法人 科学技術振興機構 広報ポータル部

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

TEL:03-5214-8404 FAX:03-5214-8432 E-mail:jstkoho@jst.go.jp

【用語説明】

1) 誘電体

広いバンドギャップを有し、電圧をかけると、その電圧に応じて電荷を蓄える性質や、直流電圧に対しては電気を通さない性質（絶縁性）を持つ材料。誘電体はコンデンサの他、電子機器の絶縁材料、半導体素子のゲート絶縁膜などにも利用されている。

2) コンデンサ

誘電体によって分離された2枚の電極もしくは電極板によって構成され、電圧をかけると、その電圧に応じて電荷（電気エネルギー）を蓄えたり、放出したりする電子部品。

3) チタン酸バリウム

化学式 BaTiO_3 で表わされるペロブスカイト構造をもつ代表的な誘電体。極めて高い誘電率を持つことからセラミック積層コンデンサなどの誘電体材料として広く使用されている重要な電子材料。

4) 酸化物ナノシート

層状酸化物をソフト化学的な処理により結晶構造の基本最小単位である層1枚にまで剥離することにより得られる、本研究グループ・オリジナルのナノ物質。

5) 積層セラミックコンデンサ

チタン酸バリウムなどの高い誘電率を持つセラミックスと電極を多数積み重ねたチップタイプのコンデンサ。

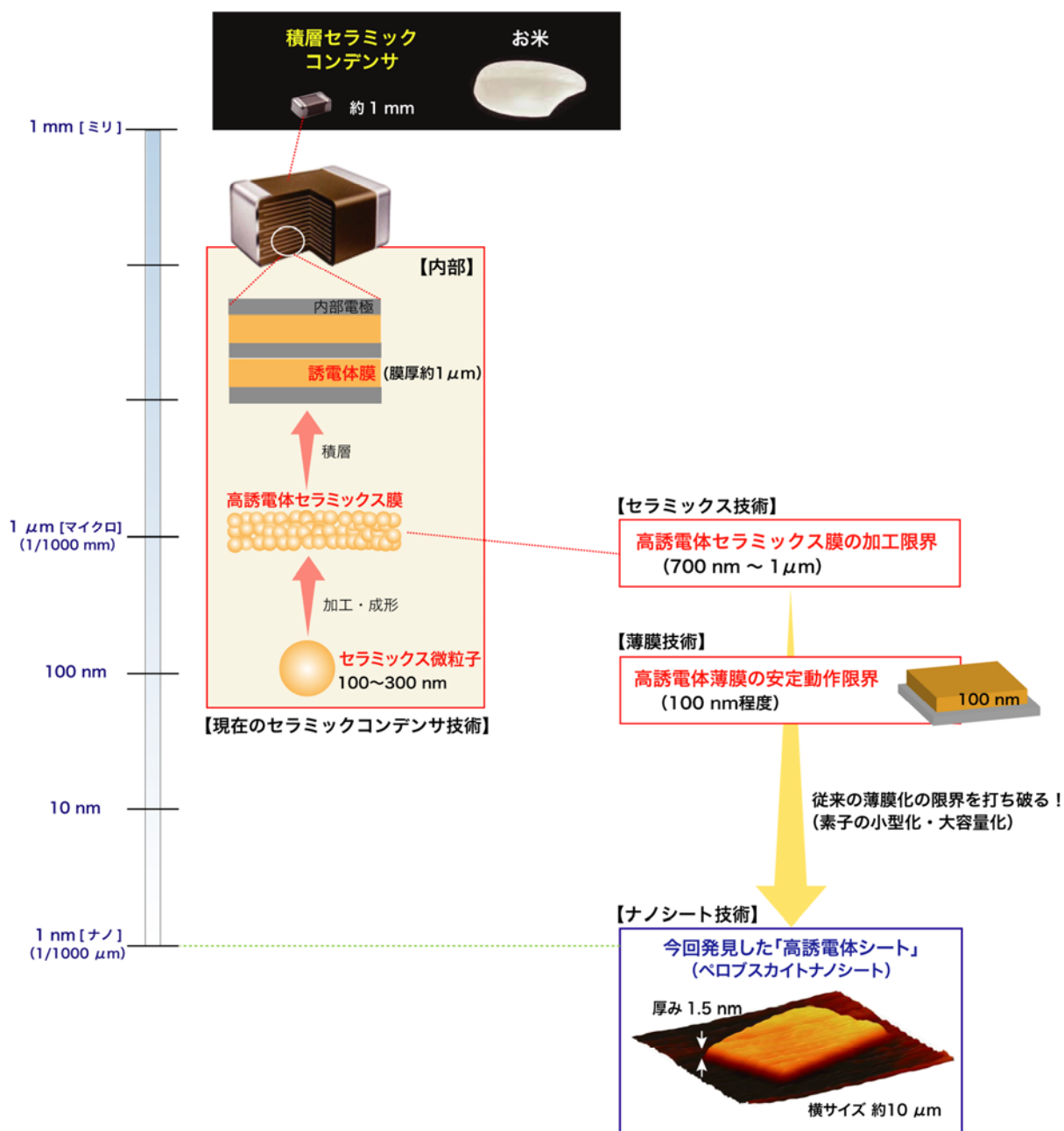


図 1 .
 (左) 現在の積層セラミックコンデンサの技術。
 (右) 今回発見した高誘電体シート (ペロブスカイトナノシート) で解決した技術課題をまとめた図。

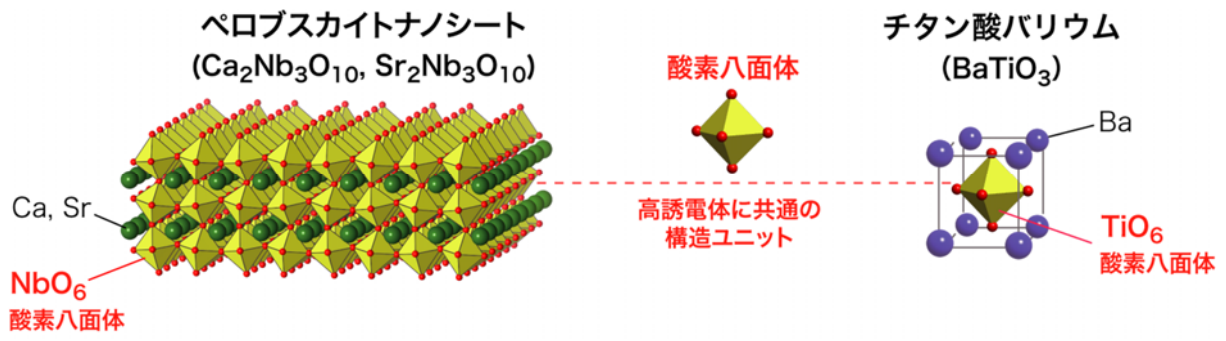
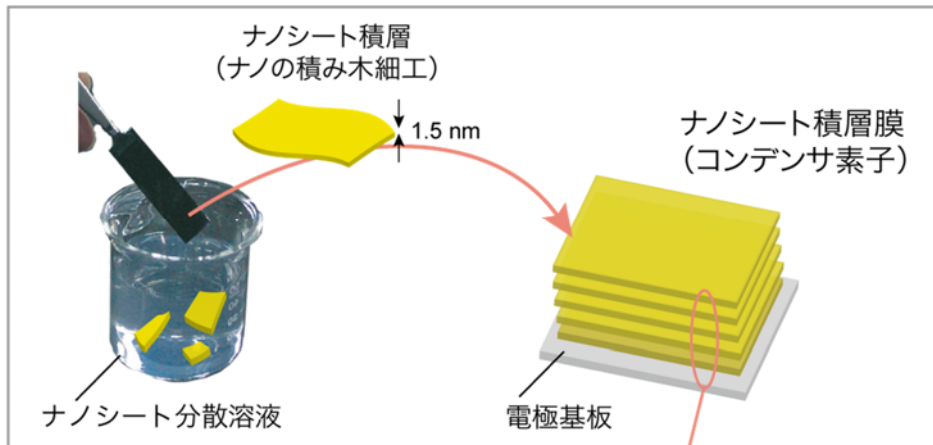


図2. ペロブスカイトナノシート ($\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$, $\text{Sr}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$) (左)とチタン酸バリウム (BaTiO_3) (右)の結晶構造の単位ユニットを比較した図。

● ビーカーのナノテク



● ナノシート積層膜の断面構造

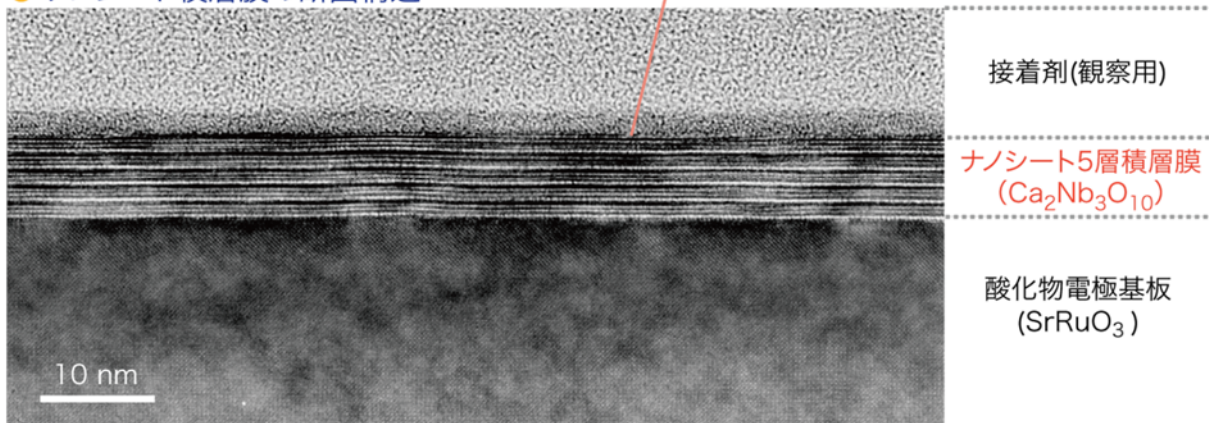


図 3.

- (上) ペロブスカイトナノシートを用いた積層薄膜素子の作製プロセス。
- (下) 酸化物電極上に作製したナノシート積層膜の透過型電子顕微鏡像。

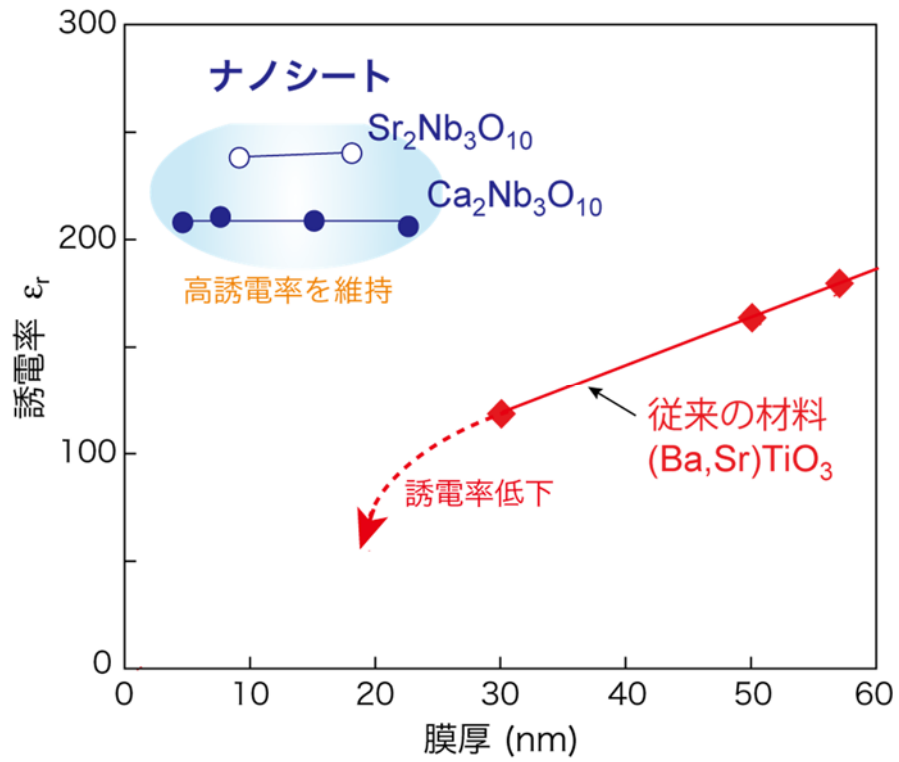


図4. ペロブスカイトナノシート ($\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$, $\text{Sr}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$) とチタン酸バリウム系薄膜 ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$) における極薄膜領域での誘電特性を比較した図。