



平成29年2月20日

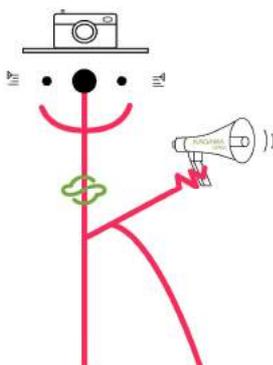
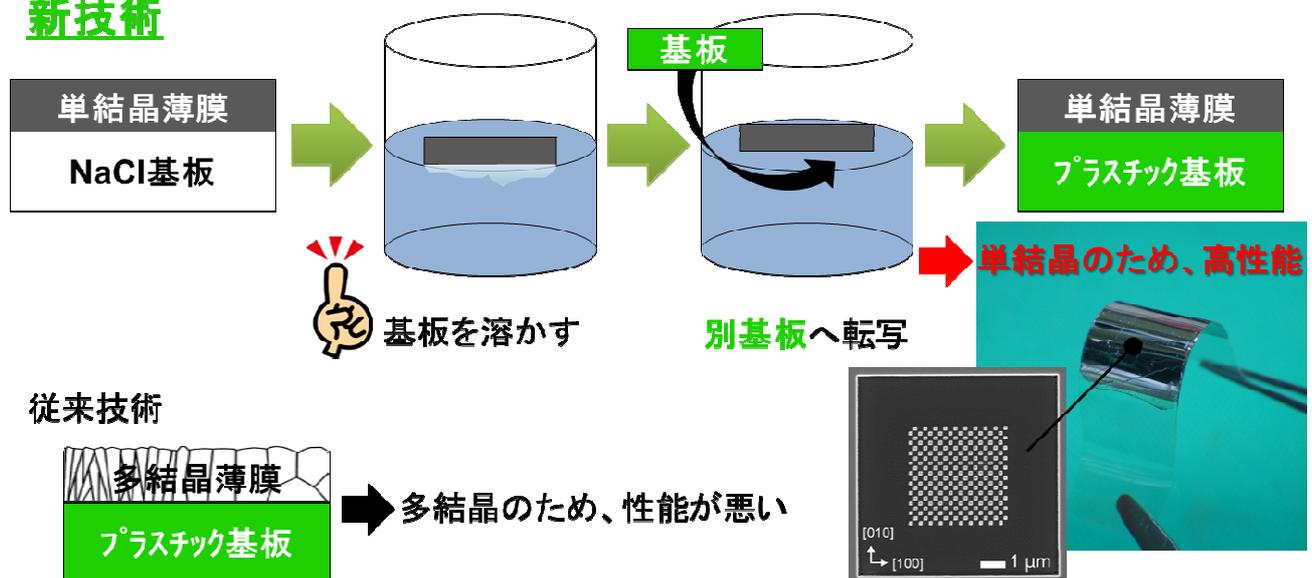
「単結晶金属薄膜の転写技術とナノ光学における高性能化」

国立大学法人香川大学工学部の山口堅三助教、須崎嘉文教授、田中康弘教授と森智博（大学院工学研究科博士後期課程3年）（以下、香川大）と和歌山県工業技術センターの森岳志博士（以下、和工技）の研究グループは、食塩（NaCl）の結晶の上に、金属薄膜を成膜し、これを転写することで、薄膜と基板の組み合わせを自由自在にする技術を開発しました。

本成果を用いることで、結晶性のない基板（ガラスやペットフィルムなど）上に、10ミリ角四方の単結晶金属薄膜を実現しています。これは、ナノメートル（10億分の1メートル）サイズに光を効率的に閉じ込め、制御する材料として期待されます。今後は、微小光工学への応用として、ナノ光回路やナノ光センサの開発を目指します。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（B）：15H03546）の支援の下で行われたもので、その研究成果は、2017年2月20日10時（英国時間）に英国のNature系電子ジャーナル「Scientific Reports」(<http://www.nature.com/srep/>)に掲載されます。

新技術



➤ お問い合わせ先
香川大学 工学部 助教 山口堅三
TEL : 087-864-2205
E-mail : kenzo@eng.kagawa-u.ac.jp
※上記不在の場合 香川大学 工学部 庶務係 岡田・廣瀬
TEL : 087-864-2000 FAX : 087-864-2032

単結晶金属薄膜の転写技術とナノ光学における高性能化

国立大学法人香川大学工学部の山口堅三助教、須崎嘉文教授、田中康弘教授と森智博（大学院工学研究科博士後期課程3年）（以下、香川大）と和歌山県工業技術センターの森岳志博士（以下、和工技）の研究グループは、金属薄膜の結晶性制御にヘテロエピタキシャル成長※1を利用することにより、ナノ光学領域における表面電磁波（表面プラズモン）※2の光性能およびその微細加工精度を飛躍的に向上できる成膜・転写技術を確立しました。従来のプラズモニクス分野では、金属薄膜の結晶性について十分な議論がなされておらず、多結晶金属薄膜の利用が一般的でありました。近年、金属由来の光損失から、エピタキシャル成長を利用した単結晶金属薄膜が注目される中、香川大と和工技は塩（NaCl）の単結晶に着目し、これを基板とすることで基板上に成長させた単結晶金属薄膜のみを取り出す技術を開発しました。

本成果を用いることで、基板選択の自由度が増し、従来困難であったガラスやペットフィルムなどの非晶質基板上における大面積な金属単結晶薄膜を実現しています。また、微細加工精度や光学特性（光センシング能を含む）の向上をそれぞれ達成しており、将来的には、プラズモニックデバイスを実現するための金属薄膜の成膜基盤技術になると期待されます。ナノメートルサイズに光を効率的に閉じ込め、これを制御することで、現在の電子回路を光回路に置き換えた各デバイスの高集積・高感度・高効率および高速化、低消費電力化を実現します。

なお、この研究は文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（B）：15H03546）の支援の下で行われたもので、その研究成果は、2017年2月20日10時（英国時間）に、英国のNature系電子ジャーナル「Scientific Reports（サイエンティフィックリポーツ）」（<http://www.nature.com/srep/>）に掲載されます。Clarivate Analytics（旧 Thomson Reuters）が2014年に発表した2013 Journal Citation Reports®ではImpact Factor（IF）は5.078（現在、IF：5.228）で、総合科学分野で5位でした。今後は、2017年3月にパシフィコ横浜で開催される第64回応用物理学会春季学術講演会や同年5月に台湾で開催されるプラズモニクスの専門国際会議（SPP8, The 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics）にて本研究の関連技術についての発表を行います。

1. 研究の背景

近年、光・電子デバイスのさらなる小型化や高効率化のために、光と物質の相互作用に着目した光の有効利用に関する研究が盛んに進められています。光によるデータ伝送は、電気を用いたそれと比較しても、高速かつ低データ損失のメリットがあります。このため、長距離データ伝送は、金属配線から光ファイバへの置き換えられるように、光信号を制御することで電子デバイスの一部を光デバイスが担うようになってきています。しかしながら、光デバイスのサイズを取り扱う光の波長以下である回折限界を超えることはできません。

これに対して、電子の集団振動である表面プラズモンを用いることで、回折限界以下の非常に小さな領域においても光を取り扱うことができるようになります。このような表面プラズモンは、金属に顕著に現れ、金属内の自由電子と光との相互作用により、金属表面やその近傍に局所的な電界が生じ、ナノメートルサイズに光を閉じ込めることができます。このため、光デバイスの高集積・高感度・高効率および高速化、低消費電力化が可能になると期待されています。しかしながら、表面プラズモン共鳴において、金属との相互作用が強いことは、同時に光学的損失（吸収による内部損失や放射損失）も大きいことを意味しており、これが表面プラズモンのフォトニクス応用への大きな障害となっています。このような光損失の具体的な要因の1つに、自由電子の振動が金属内の格子欠陥や結晶粒界によって妨げられることにあります。そこで、将来のデバイスを見据えた金属材料の結晶性を制御した構造やそのときに用いる基板や成膜条件（サイズや膜厚など）、全作製プロセスを視野に入れた成膜法の提案が求められています。

そのような中、香川大と和工技では、基板選択の自由度を有する大面積かつ高品位な単結晶金属薄膜の成膜法を通し、表面プラズモンの利活用の研究を行ってまいりました。

2. 研究の成果

香川大と和工技の共同研究チームは、RF マグネトロンスパッタを用い、劈開した単結晶 NaCl(001) 基板上での銀のヘテロエピタキシャル成長により、大面積かつ高品位な単結晶金属薄膜の成膜技術を構築しました。また、これに NaCl 基板の水への溶解性を組み合わせることで、浮遊した単結晶金属薄膜を非晶質基板上へ転写することに成功しました（図 1）。単結晶金属薄膜は、100 mm² サイズで 0.814 nm の面粗さ (Rq) を示し、従来の成膜法に比べ、1/4 の表面平滑性に優れています（図 2）。また、転写後（加工前）の局所的な結晶方位解析において、金属薄膜は、単結晶 NaCl(001) 基板に平行な結晶成長を示し、単結晶を形成していることを確認しました。多結晶および単結晶金属薄膜を用いた集束イオンビームによる微細加工では、多結晶構造は結晶粒の方位や大きさが異なることから微細加工に不適であるのに対し、単結晶構造の加工精度は非常に良く、またこのときに強い散乱光特性（プラズモン共鳴波長）を観測しました（図 3）。考案した金属単結晶薄膜の成膜および転写法を用いれば、基板を自由に選択することが可能となるため、ウェアラブルデバイスの発展に呼応した透明および耐久性を始め、フレキシブル性や伸縮性を実現できます（図 4）。

なお、光センシングとしての表面増強ラマン散乱において、単結晶構造は多結晶構造に比べ、5 倍の検出感度を有することが分かりました（図 5）。これにより、さらなる構造の最適化により、光センシング能を高めることができます。

3. 技術のポイント

単結晶 NaCl(001) 基板上での金属ヘテロエピタキシャル成長による大面積かつ高品位な単結晶金属薄膜を成膜する技術と NaCl 基板の溶解を組み合わせることで、基板を限定しない単結晶金属薄膜の形成を実現しました。10×10 mm² の大面積において、表面粗さが 0.81 nm の平滑な薄膜が得られ、結晶面に沿った微細加工から高精度な形状を維持しました。加工した単結晶構造の表面プラズモンに由来する光学特性は、尖鋭かつ高光強度な共鳴波長を観測しており、これは BPT 分子の表面増強ラマン散乱特性からも通常より 5 倍の増強度となり、単結晶薄膜の優位性を顕著に示しました。確立した成膜法を用いれ

ば、プラズモニクス分野のみならず、多岐に渡る分野での波及効果も期待できます。

4. 今後の展開

考案した単結晶金属薄膜と従来の多結晶金属薄膜との光学定数の解析を準備しています。また、考案した成膜法について、種々の金属においても確認を進めています。さらに、構造の最適化により、数値解析を進めています。そして、最終的には、本成膜法を用いた各プラズモンチップ（特許査定済）の作製や新規デバイスへの応用まで拡張し、将来の光通信やセンサ等のウェアラブルデバイスの発展に対応するための実証実験を目指します。これにより、単結晶金属薄膜を用いたプラズモニクスの研究が加速され、将来的にコンピュータやネットワーク機器の大幅な高集積・高感度・高効率および高速化、低消費電力化が期待されます。

用語解説

※1 ヘテロエピタキシャル成長

ある下地となる結晶の結晶方位と一定の関係を持ちながら結晶が成長すること（薄膜ハンドブックより）。

※2 表面プラズモン

電子密度の濃淡が波のように伝搬する電子の集団運動のこと。損失が小さく、光（電磁波）の波長より小さい領域（～10 nm）に閉じ込めることができる特徴を持つ。

別紙・参考資料

- 図1 考案した NaCl 単結晶を用いた金属薄膜転写法
- 図2 多結晶 vs 単結晶薄膜評価（表面、X線回折）
- 図3 多結晶（PC） vs 単結晶（SC）構造の光学特性
- 図4 PET フィルム上の SC-Ag 構造
- 図5 センサ（表面増強ラマン散乱（SERS）用基板）

【本件に関するお問い合わせ先】

国立大学法人 香川大学

工学部材料創造工学科 助教 山口堅三

TEL : 087-864-2205

E-mail : kenzo@eng.kagawa-u.ac.jp

ニュースリリースに記載している情報は、発表日時点のものです。現時点では、発表日時点での情報と異なる場合がありますので、あらかじめご了承くださいとともに、ご注意をお願いいたします。

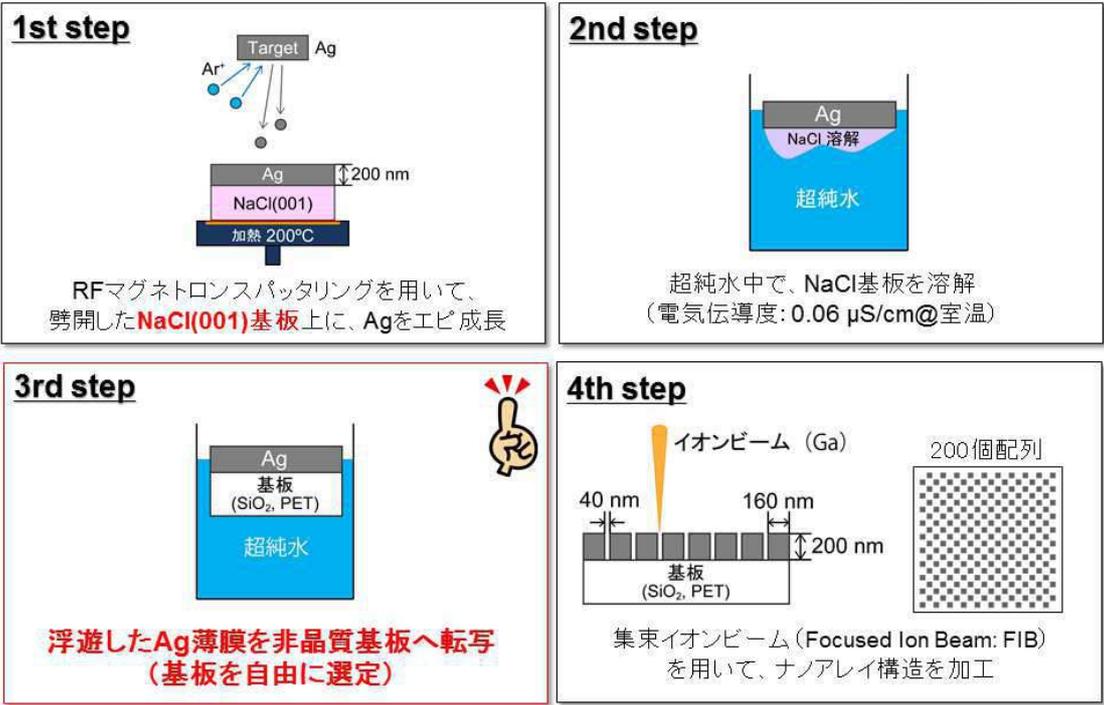


図 1

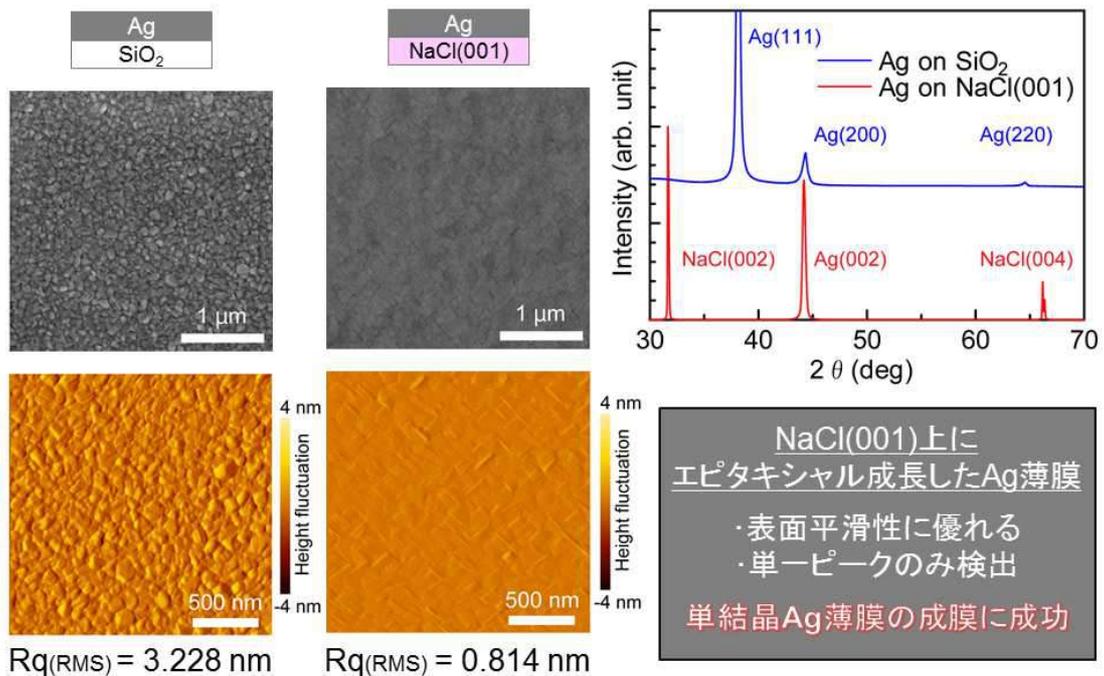


図 2

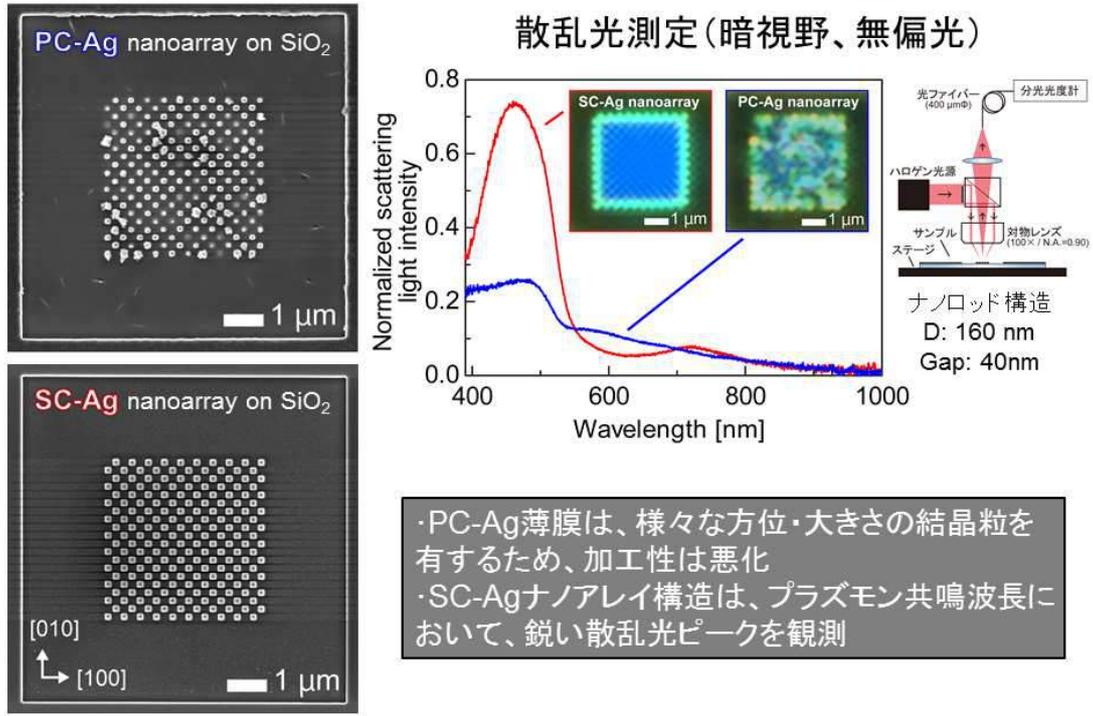


図 3

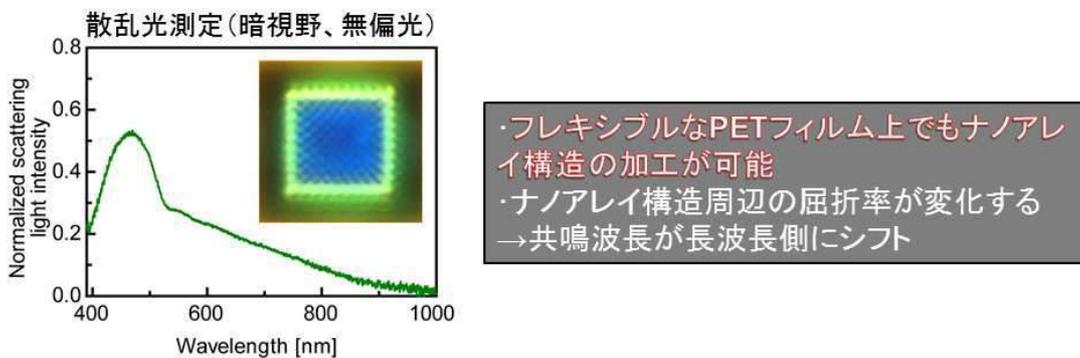
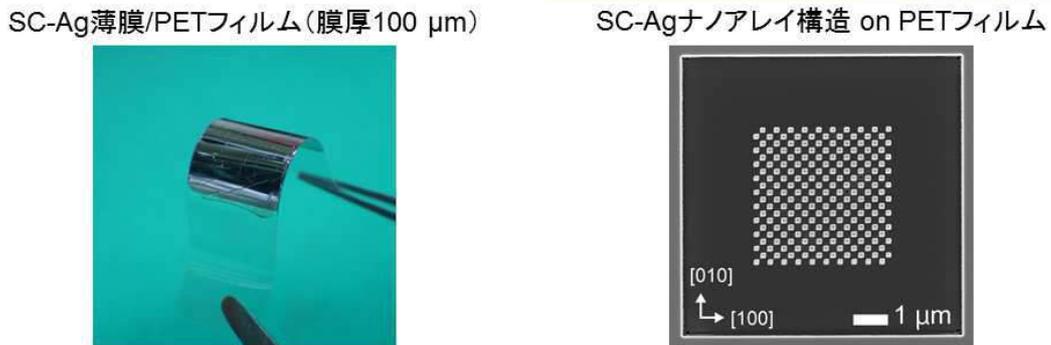
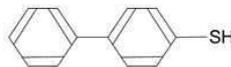
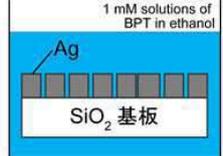


図 4

検出分子
Biphenyl-4-thiol(BPT)



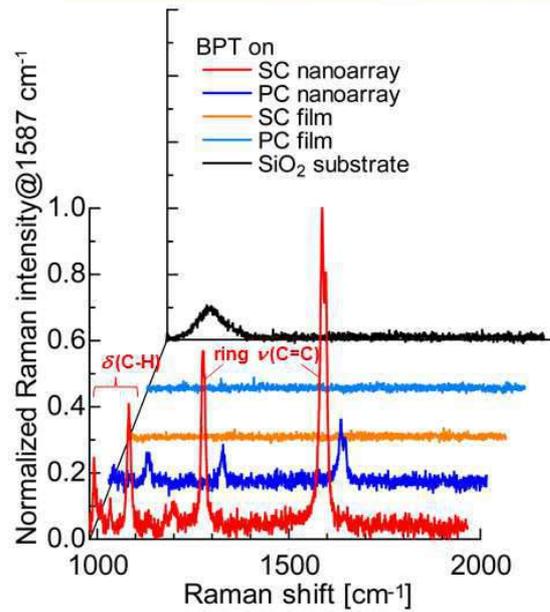
1 mM solutions of BPT in ethanol



24hr 浸漬

レーザーラマン分光光度計

日本分光製: NRS-3000
532 nm 半導体レーザー
(強度: ~300 $\mu\text{W}/\mu\text{m}^2$
ビーム径: 約700nm)
露光時間: 60 sec
平均回数: 1回



ナノアレイ構造によるSERS効果を確認
SC-Agナノアレイ構造は、PC-Agナノアレイ構造に比べて、ラマン強度が5倍に

図 5

発表雑誌

雑誌名

Scientific Reports

論文タイトル

Fabrication of single-crystalline plasmonic nanostructures on transparent and flexible amorphous substrates

著者

Tomohiro Mori, Takeshi Mori, Yasuhiro Tanaka, Yoshifumi Suzaki, and Kenzo Yamaguchi

DOI 番号

10.1038/srep42859

アブストラクト URL

www.nature.com/articles/srep42859