

令和 6 年 9 月 6 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05453

研究課題名(和文) Creating Hot-Electron Photocatalyst Architectures with Optimal Mass Transport Properties using Plasmonic Mesoporous Metal Nanoparticles

研究課題名(英文) Creating Hot-Electron Photocatalyst Architectures with Optimal Mass Transport Properties using Plasmonic Mesoporous Metal Nanoparticles

研究代表者

HENZIE Joel (HENZIE, JOEL)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・ナノアーキテクニクス材料研究センター・主幹研究員

研究者番号：80644517

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多孔質金属ナノ粒子と薄膜、およびフォームを作成する簡単で低コストな方法を開発しました。これらの構造と光の相互作用を調べるため、電子線トモグラフィーを使用し多孔質金属ナノ粒子の3D構造をマッピングしました。その後3Dモデルと計算機シミュレーションを用いて、多孔質金属の光学特性を説明する簡単な理論的枠組みを策定しました。これらの結果は多孔質金属が光触媒として機能し、有機分子の光分解を促進することを示しました。また大孔径金属フォームを中孔径銀でコーティングする技術を開発し、これらのハイブリッドフォームを使用して海洋環境で蔓延する汚染物質であるマイクロプラスチックを識別、および収集しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メソポーラス金ナノ粒子の研究は、新合成法の開発や電子トモグラフィによる3D構造の詳細なマッピング、またその構造を基にした光学特性のモデリングや理論構造の確立など、多角的に進展しています。これらをもとにナノテクノロジーと材料科学の研究はさらに発展するでしょう。また光触媒の応用で有機汚染物質の分解が可能となり、水質浄化に貢献できます。マクロポーラス-メソポーラス金属フォームの開発は、海洋環境のマイクロプラスチック収集と識別を可能にし、生態系保護に役立ちます。この成果は予想外であり、時間が経つにつれ元素から発展しました。持続可能性と社会的課題の解決に向けた重要な一歩です。

研究成果の概要(英文)：We developed simple and inexpensive methods to create porous metal nanoparticles, films, and foams. To examine how these structures interact with light, we mapped the three-dimensional (3D) structures of porous gold nanoparticles with electron tomography. Then we used 3D models and computer simulations to formulate a simple theoretical framework to explain the optical properties of porous metals. These results showed that porous metals can behave as photocatalysts to facilitate the photodegradation of organic molecules. Additionally, we developed a technique to coat macroporous metal foams with mesoporous silver, and used these hybrid foams to collect and identify microplastics which are a prevalent pollutant in marine environments.

研究分野：ナノマテリアル

キーワード：ナノマテリアルの合成 電子トモグラフィ 光学シミュレーション プラズモニクス 表面増強ラマン分光法 (SERS) 光触媒 マイクロプラスチック 機械学習

1. 研究開始当初の背景

私たちのグループは2019年までに、制御された三次元(3D)金属表面を持つ多孔質金属構造を合成することに多数成功しました。その後、プラズモン増強触媒分野の著名な科学者たちが、これらのナノ空間に閉じ込められた金属構造をプラズモン駆動の光化学に利用することを提案していることに気付きました[1]。多孔質金属の複雑な3D構造はナノスケールでまだ十分にマッピングされていませんでした。そこで、3D内部および外部の多孔質金属構造を記述し、その構造が光学および触媒の特性に与える影響を示すことで、この分野に貢献できると考えました。

2. 研究の目的

私たちの初期目標は次のとおりです：**(1)** 単分散径および調整可能な直径の孔を持つメソポーラス金属ナノ粒子を合成すること。プラズモニクス研究で最も広く使用されている金(Au)を、最初の材料として選びました。**(2)** 透過型電子顕微鏡(TEM)トモグラフィーを用いて、メソポーラスAuナノ粒子の内部および外部の3D構造をマッピングすること。**(3)** TEMトモグラフィーデータを使用して3Dステレオリソグラフィモデルを作成し、その後、電磁(EM)シミュレーターを使用して粒子の光学特性をモデル化すること。**(4)** 光活性ポリマーを用いてホットエレクトロン放出を撮像すること。**(5)** 粒子の光触媒特性をテストすること。

3. 研究の方法

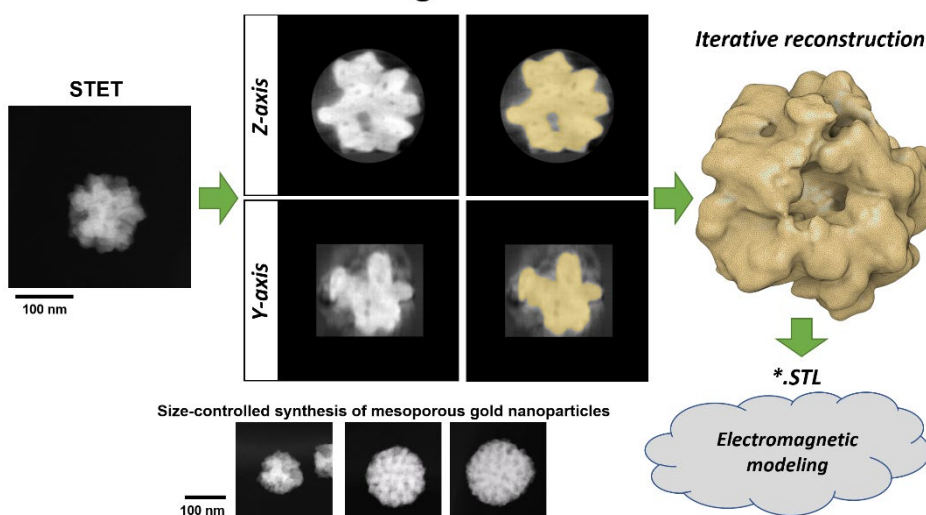
このプロジェクトでは、次の3つの研究方法を使用しました：**(1)** 走査透過型電子顕微鏡トモグラフィー(STET)。STETは、異なる傾斜角度で取得した一連の2D画像を使用して複雑な構造の3D表現を作成し、反復再構成アルゴリズムを使用して原子解像度で内部構造を再現します。この方法は、メソポーラスナノ粒子を含む複雑な材料の形態と組成を研究するのに役立ちます。**(2)** 計算電磁シミュレーション。STETで作成したモデルを有限要素法でモデル化し、その光学特性を記述し、実験スペクトルと比較しました。**(3)** 関連する化学反応を用いて、メソポーラスナノ粒子の光触媒活性をテストすること。

4. 研究成果

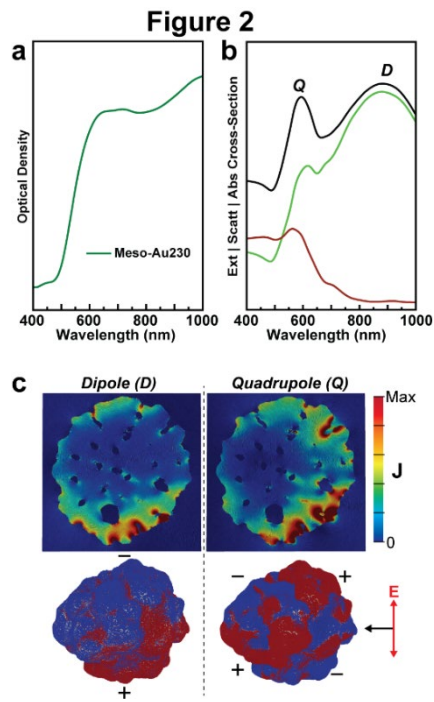
(1) 大きな調整可能な孔を持つメソポーラス金(Au)ナノ粒子の合成：一般的に、可視波長の光は、金属ナノ構造の表面プラズモンと相互作用しますが、その特徴の寸法はおおよそ数十から数百ナノメートルです。以前、私たちは直径約5nmの孔を持つメソポーラスナノ粒子を合成する方法を開発しました[2]。このプロジェクトでは、直径20~60nmの孔を持つメソポーラス金ナノ粒子を作成する新しい方法を開発しました。大きな孔は光の吸収を改善し、ナノ粒子のサイズを維持しながらプラズモン共鳴の調整を可能にしました。この新しい合成コロイド法は、金-チオレートポリマーを中間段階として使用する古いナノクラスター合成法からヒントを得ました[3]。金をポリマー化することで、その移動性が制限され、孔形成ブロック共重合体ミセル(BCMs)が捕捉されます。BCMsの直径を変えることで、孔のサイズを調整することができます[4]。

(2) メソポーラス金ナノ粒子のSTET：Figure 1はSTETモデルを撮影し、STET画像スタックのコントラストを識別して、Y軸とZ軸に沿った多孔質金属を特定するための過程を示しています。その後、粒子を再構築し、EMシミュレーターでモデル化できる光造形法(*.STL)ファイルに変換しました[4]。私たちはSTETで多数の粒子を測定しましたが、特に外径120nm、180nm、230nm、孔径20nmの粒子に注目しました[4]。

Figure 1

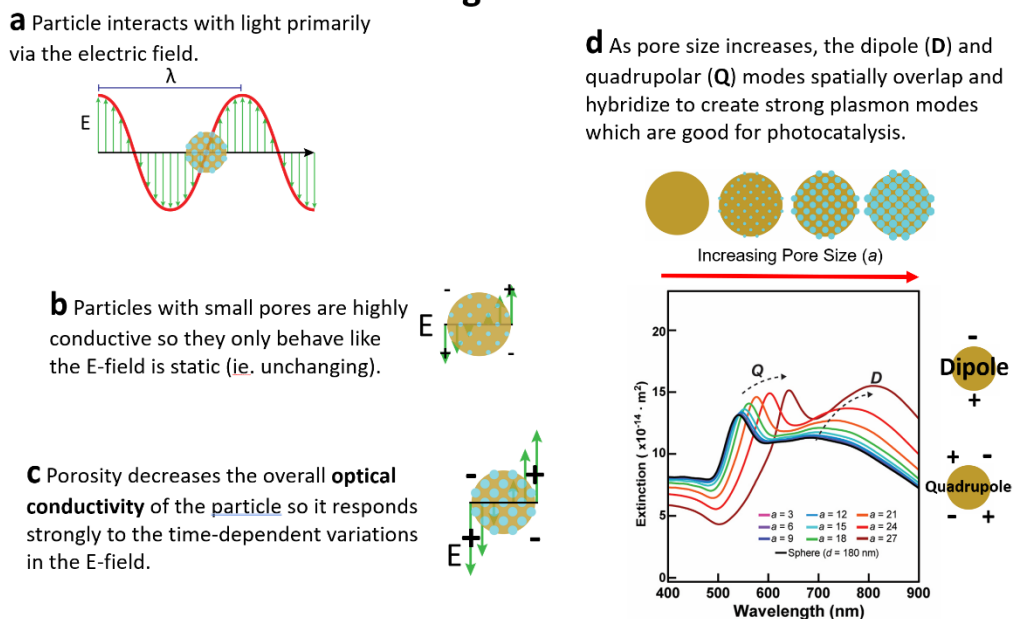


(3) 多孔質金属ナノ構造におけるプラズモン共鳴の基本的な説明：上述の直径 120nm、180nm、230nm のナノ粒子バッチから UV-VIS 光学スペクトルを収集し、対応するメソポーラス金ナノ粒子モデルの計算断面積と比較しました。この報告書では、直径 230nm のメソポーラス粒子の結果のみを **Figure 2** に示します。実験的な UV-VIS スペクトルには数百万の粒子が含まれますが、ここではよく分解された1つのピークと別のピークの端を見ることができます (**Figure 2a**)。EM シミュレーションによって、STET データを用いた消光、散乱、および吸光断面積のモデル化が可能になりました (**Figure 2b**)。ここでも、実験スペクトルとほぼ一致する2つのピークが観測されます。UV-VIS はバルク測定であり、シミュレーションに使用される光学定数はバルク金に対するものであり、多少の違いは予想されます。大きな粒子の消光スペクトルは散乱によって支配されており、短波長ピークは吸収が多く、これは四重極モードの特徴であります。プラズモンモードは、電流密度マップと 3D 電荷分極をプロットすることで調べました (**Figure 2c**)。電流密度 (J_{ex}) は、孔内で最も高い電場強化に寄与する金属内の領域を検出する有用な方法です。モデル化された粒子は、粒子内部にまで浸透する強い J_{ex} をサポートし、電荷分極プロットは粒子が双極 (D モード) および四重極 (Q モード) をサポートしていることを示しています。



Au ナノ粒子のプラズモン共鳴に孔がどのように影響するかを説明するために、孔のサイズが大きくなるシミュレーションを行い、読者に簡単かつ段階的に理解してもらうためのイラストを作成しました (**Figure 3**)。光は電場を介して金粒子と相互作用し、プラズモン共鳴と呼ばれる伝導電子の集団振動を励起します (**Figure 3a**)。小さな孔を持つ粒子は非常に導電性が高く、電場が静的で変化のないように機能します (**Figure 3b**)。多孔性は粒子の全体的な光学伝導性を低下させるため、粒子は局所的な電場の変動に強く応答し、通常は正味の双極子がゼロで (すなわちダークモード) であるため非常に弱いはずの高次モード (例: 四重極モード) を光が強く励起できるようになります (**Figure 3c**)。多孔性は粒子の全体的な光学伝導性を低下させるため、粒子は時間依存的な電場変動に強く反応し、双極子モード (D モード) と四重極モード (Q モード) の重ね合わせを生成します。この「ハイブリッドモード」は、より強い局所電場強度をもたらすことがあります (**Figure 3d**)。これらの強い電場強度は光触媒反応を強化するはずですが、興味深いことに、孔が秩序化されているか無秩序であるかにかかわらず、D モードと Q モードの位置と形状はほぼ同じであり、導電性結合が主要なメカニズムであり、孔の周期的な間隔よりもむしろ局所的な光学伝導性がナノ粒子の特性を支配していることを示しています。

Figure 3



(4) メソポーラス Au ナノ粒子の光触媒特性：プラズモン駆動の光触媒作用の文脈において、ハイブリッドモードは通常のプラズモンモード (すなわち、原始的なブライトモード) よりも強力

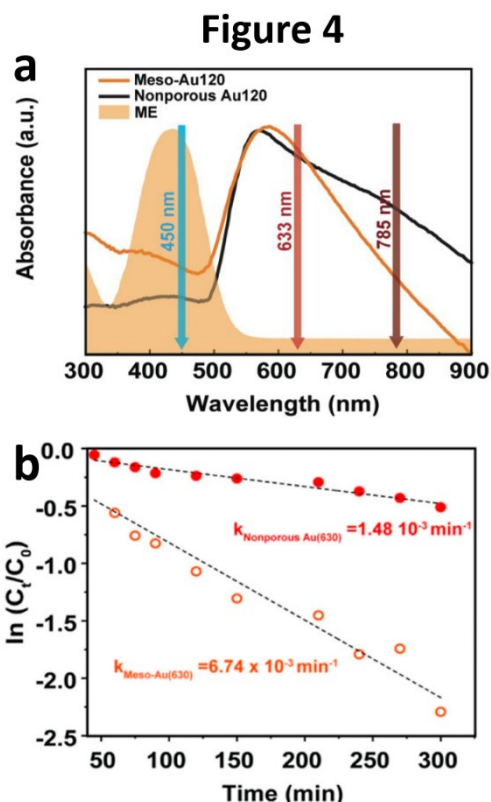
な電磁場を生成するため、有益となる可能性があります。さらに、それらは金属の触媒活性部位が最も密集している多数の原子段差や屈曲部がある領域に共局在するため、相乗的な触媒効果をもたらすはずで、多孔性は、反応物、金属表面、およびプラズモン駆動の電場（およびその結果生じる熱）との相互作用数を最大化するため、有機触媒変換においても重要です。

プラズモンが有機反応に与える影響を調べるために、メタニールイエロー (ME) のプラズモン駆動分解をモデル反応として使用しました。ME は、青色波長を強く吸収する環境汚染物質であり、発がん性が知られているアゾ染料です (Figure 4a)。私たちがプラズモンの光触媒的役割を観察できる 120 nm 径のメソポーラス Au ナノ粒子 (「meso-Au120」) の光触媒性能を調べたのは、ECSA で推定される最大の表面積を持ち、 ~ 600 nm でハイブリッドプラズモンモードを支持し、ME の吸収ピークから遠く離れた波長にあるためでした。触媒効率を比較するために、非多孔性の直径 120 nm Au ナノ粒子 (「nonporous Au120」) を使用しました。同量のメソ-Au120 および非多孔質 Au120 を 15 mg/L の ME と混合し、さまざまな励起波長 ($\lambda_{ex} = 450, 633, 785$ nm) のダイオードで照射しました。分解の反応速度は、435 nm の ME 吸光ピークを用いて追跡しました (Figure 4b)。また、一次速度則: $\ln(C_t/C_0) = -kt$ を用いて速度定数を計算しました。励起波長 633 nm の $k_{\text{meso-Au}}$ は、 $6.74 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ と求められました。非多孔質 Au120 NP の場合、混合後に吸着は観察されず、 $\lambda_{ex} = 633$ nm での光触媒 ME 分解は、 $k_{\text{nonporous Au}} = 1.48 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ で進行了。プラズモン駆動分解速度が 4.5 倍に増加したことは、Au 表面の触媒効果を考慮しても、多孔質金構造の影響を示しています。これらの結果は、メソポーラス構造を持つナノ粒子がプラズモン駆動反応を促進し、非多孔性ナノ粒子に比べてより穏やかな反応条件（すなわち、低温、低圧、反応時間、および触媒量）を使用できることを示しています。多孔性の調整は、金属の活性部位の数と密度、プラズモン共鳴の波長と帯域幅の両方に二重の効果をもたらします[4]。

この科研費助成は 2020 年 4 月に開始されましたが、COVID-19 パンデミックによって大きな影響を大きく受けたのは、主に研究室の人員不足と国内外の新規採用で困難を極めたことでした。そこでサンプルを海外の共同研究者に送り、状況を最大限に活用するために共通する基盤を見出しながら多くの作業を行いました。この作業により、私たちの触媒研究において多くの成果が得られました。例えば、多孔質金ナノ粒子クラスターを用いたプラズモン駆動アルコキシアミンのホモポリシス[5]、プラズモン増強光触媒作用を研究するための CO2 光還元実験のための同位体トレーサー実験の開発[6]、MOF を選択層として使用するプラズモン共鳴センサー[7]、および現在プラズモン基板として探索中の MXene/金属ハイブリッドの電極触媒特性[8]などです。また、多孔性金属におけるホットエレクトロン放出を理解するための多孔質金の超高速光学特性の実験を行いました (未発表)。

ナノ粒子は、光触媒作用および光電触媒作用に対するメソポーラス性の影響を研究するのに容易なシステムではないことがわかりました。そのため、電気触媒システムに容易に統合でき、プラズモン駆動の光電触媒作用のために光と強く相互作用する新しい種類のメソポーラス構造を探し始めました。同じ頃、海洋環境におけるマイクロプラスチック (MP) 汚染が社会的問題化しつつあったため、海洋環境における MP を捕捉、識別、および破壊できる新しい種類のメソポーラス金属構造の作成を検討しました。

(5) 階層的なマクロポーラス-メソポーラス金属構造の作成: メソポーラス構造の光触媒特性を向上させるため、我々の合成技術を応用し FY20-FY22 の研究よりも強固な光吸収特性と再現性を持つ 3D 構造に堆積させました。メタルフォームは、比較的低コストで多くの金属で製造可能な基材です。そこで、銀フォーム上にメソポーラス銀を直接電着する方法を開発しました (Figure 5a)。銀 (Ag) を選んだ主な理由は、プラズモニック Ag 材料と相性が良い 532 nm レーザーを備



えた共焦点ラマン顕微鏡を持っていたためでした。Ag 表面を保護するために、ジアゾニウム修飾を用いて疎水性層でコーティングをしました。Figure 5b は、X 線トモグラフィーによる Ag フォームの画像であり、SEM 画像はマクロポーラスフォーム（平均孔径：160 μm ）およびメソポーラス Ag 表面（平均孔径：28 nm）を示しています[9]。

(6) 階層的多孔性 Ag フォーム上での自己注意型ニューラルネットワークを用いた前処理不要の SERS によるマイクロプラスチック (MP) の検出

水サンプル中のマイクロプラスチックの検出と識別は環境モニタリングに不可欠ですが、マイクロプラスチックの構造がバイオフィルムや藻類、および分解した有機物由来の天然有機化合物と類似していることもあり、困難です。既存の検出方法は、一般に時間とコストがかかる複雑な分離技術を必要とします。階層的金属フォームを作成している際に、さまざまな MP を用いてそれらが流動溶液中で MP を捕捉し、プラズモンを介して分解する効果をテストし始めました。階層的多孔性構造は毛細管力を強化して MP を捕捉し、疎水性表面は生体分子や塩の吸着を最小限に抑えます (Figure 6a)。計算流体力学モデルは、メソポーラスが液体の流れを遅くすることを示しています。階層的多孔性は、プラズモン共鳴を介して局所的に光吸収も強化します。セクション(3)で開発したツールと洞察を用いて光学特性をモデル化し、多孔質構造が強く局在化した電磁場を生成する方法を示しました。

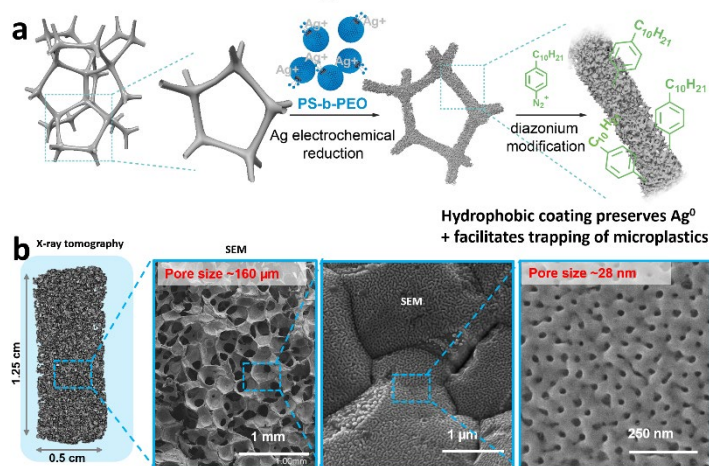
このような強い電磁場中の分子のラマン散乱断面は、表面増強ラマン分光法 (SERS) と呼ばれるプロセスによって強化されます (Figure 6b)。これらの表面を使用して、海水中およびさまざまな環境汚染物質中の 6 種類のマイクロプラスチック (ポリスチレン、ポリメチルメタクリレート、ナイロン、ポリエチレン、テフロン、ポリエチレンテレフタレート) の SERS 信号を測定しました。SERS スペクトルは非常に複雑で、複数の重なり合うピークがあり、MP の混合物を識別するのは困難でした。近年、研究者はニューラルネットワーク (NN) をさまざまな分析検出技術に応用して、未知のサンプルの構成に関する重要な決定を下すようになりました。私たちは、「自己注意」と呼ばれる特別なメカニズムを使用して、NN が入力データポイント間の関係を同時に評価し、シーケンス内の任意の部分と複雑な依存関係を解釈できるようにするタイプの NN を開発しました。この NN をワークフローに実装することで、さまざまな干渉因子が存在する場合でも、多成分混合物を分類できるようになりました[9]。私たちは現在、3D プリント基板を用いて、経済的コストを抑えながら MPs と光の捕獲を強化する研究を行っています。この科研費助成を通して、多孔性金属と光に関する基礎的な理解から、この知識を応用して光触媒やセンシングへの応用を探索し、社会的に良い影響を与え、私たちの世界を改善することへと、アイデアが進展しました[9]。

現在 3D プリント基板を用いて、経済的コストを抑えながら MP と光の捕獲を強化する研究を行っています。この科研費助成を通じて、多孔質金属と光に関する基本的理解と、その知識を光触媒と検出分野で応用することにより、社会に前向きな影響を与え世界を改善するアイデアに大きな進展がありました。

<引用文献>

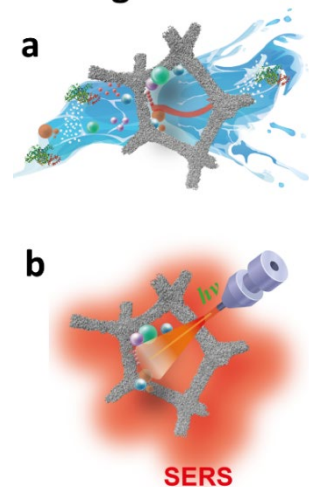
- [1] Baumberg, J.; Faraday Discussions, 214, 2019, 501-511.
- [2] Lv, H.; Xu, D.; Henzie, J.; et al.; Chemical Science, 10, 2019, 6423-30.
- [3] Negishi, Y.; Nobusada, K.; Tsukuda, T.; JACS, 127, 2005, 5261-70.
- [4] Nugraha, A.; Guselnikova, O.; Henzie, J.*; et al.; Chem. Mat. 34, 2022, 7256-70.
- [5] Votkina, D.; Petunin, P.; Henzie, J.; et al.; ACS Catalysis, 13, 2822-33.
- [6] Wang, S.; Jiang, B.; Henzie, J.; et al.; Nature Communications, 14, 2023, 2534.
- [7] Gumilar, G.; Henzie, J.; et al. J. Mat. Chem. A, 10, 2022, 6662-78.
- [8] Tang, Y.; Henzie, J.*; et al. ACS Sust. Chem & Eng., 11, 2022, 168-76.
- [9] Guselnikova, O.; Henzie, J.*; et al.; Nature Communications, 15, 2024, 4351.

Figure 5



Hydrophobic coating preserves Ag⁰ + facilitates trapping of microplastics

Figure 6



SERS

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件/うち国際共著 10件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nugraha Asep Sugih, Guselnikova Olga, Henzie Joel, Na Jongbeom, Hossain Md Shahriar A., Dag Omer, Rowan Alan E., Yamauchi Yusuke	4. 巻 34
2. 論文標題 Symmetry-Breaking Plasmonic Mesoporous Gold Nanoparticles with Large Pores	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 7256 ~ 7270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.2c01125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Votkina Darya, Petunin Pavel, Miliutina Elena, Trelin Andrii, Lyutakov Oleksiy, Svorcik Vaclav, Audran Gerard, Havot Jeffrey, Valiev Rashid, Valiulina Lenara I., Joly Jean-Patrick, Yamauchi Yusuke, Makkath Junais Habeeb, Henzie Joel, Guselnikova Olga, Marque Sylvain R. A., Postnikov Pavel	4. 巻 13
2. 論文標題 Uncovering the Role of Chemical and Electronic Structures in Plasmonic Catalysis: The Case of Homolysis of Alkoxyamines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 2822 ~ 2833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.2c04685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tang Yi, Yang Chenhui, Xie Yangyang, Kang Yunqing, Que Wenxiu, Henzie Joel, Yamauchi Yusuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Tailored MXene Nanoarchitectonics: MXene with Mesoporous Nitrogen-Doped Carbon Confined Ultrafine Molybdenum Carbide Nanodots for Efficient Electrocatalytic Hydrogen Evolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry & Engineering	6. 最初と最後の頁 168 ~ 176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.2c05106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Gumilar Gilang, Henzie Joel, Yulianto Brian, Patah Aep, Nugraha Nugraha, Iqbal Muhammad, Amin Mohammed A., Hossain Md. Shariar A., Yamauchi Yusuke, Kaneti Yusuf Valentino	4. 巻 10
2. 論文標題 Performance enhancement strategies for surface plasmon resonance sensors in direct glucose detection using pristine and modified UiO-66: effects of morphology, immobilization technique, and signal amplification	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 6662 ~ 6678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1ta08741j	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tang Yi, Yang Chenhui, Xu Xingtao, Kang Yunqing, Henzie Joel, Que Wenxiu, Yamauchi Yusuke	4. 巻 12
2. 論文標題 MXene Nanoarchitectonics: Defect Engineered 2D MXenes towards Enhanced Electrochemical Water Splitting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Energy Materials	6. 最初と最後の頁 2103867 ~ 2103867
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.202103867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lim Hyunsoo, Kim Dabum, Kim Yena, Nagaura Tomota, You Jungmok, Kim Jeonghun, Kim Hyun-Jong, Na Jongbeom, Henzie Joel, Yamauchi Yusuke	4. 巻 8
2. 論文標題 A mesopore-stimulated electromagnetic near-field: electrochemical synthesis of mesoporous copper films by micelle self-assembly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 21016 ~ 21025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0TA06228F	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 GuseInikova Olga, Trelin Andrii, Kang Yunqing, Postnikov Pavel, Kobashi Makoto, Suzuki Asuka, Shrestha Lok Kumar, Henzie Joel, Yamauchi Yusuke	4. 巻 15
2. 論文標題 Pretreatment-free SERS sensing of microplastics using a self-attention-based neural network on hierarchically porous Ag foams	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-024-48148-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Joel Henzie
2. 発表標題 Creating High Anisotropy Hierarchical Metals
3. 学会等名 Kaunas Technological University (Lithuania) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Joel Henzie
2. 発表標題 Controlling Materials-Space in Inorganic Materials
3. 学会等名 Advanced Materials and Technologies 2021 (https://advancedmaterials.ktu.edu) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Joel Henzie
2. 発表標題 Making Catalysts More Efficient using Nanoarchitectonics
3. 学会等名 MANA International Symposium (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Joel Henzie, Olga Guselnikova
2. 発表標題 Hierarchical porous metals
3. 学会等名 Materials Oceania 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ravi Nandan, Joel Henzie
2. 発表標題 Rational Design of Single-phase Multi-metal Mesoporous Nanostructures for a Sustainable Future
3. 学会等名 Materials Oceania 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Joel Henzie
2. 発表標題 Coupling Hybrid Plasmonic-photonic Resonances with Mechanical Vibrations in Long-Range Self-assembled Nanoparticle Arrays
3. 学会等名 Materials Oceania 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yusuke Ide, Joel Henzie, Kenya Kani, Yusuke Yamauchi	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 274
3. 書名 System-Materials Nanoarchitectonics (ISBN: 978-4-431-56911-4)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山内 悠輔 (Yamauchi Yusuke) (10455272)	名古屋大学・School of Engineering・Professor (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------