

2024 年度年次報告書

原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能

2020 年度採択研究代表者

末永 和知

大阪大学 産業科学研究所
教授

ナノ空隙を利用した原子・分子の配列制御と物性測定法開発

主たる共同研究者:

吾郷 浩樹 (九州大学 大学院総合理工学研究院 主幹教授)

中西 勇介 (東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授)

研究成果の概要

本研究課題は、2024 年度も順調に進捗した。主なテーマであるナノ空間を用いた新しい構造をもつ物質の開拓においては、中西グループが塩化モリブデンと硫黄の蒸気をカーボンナノチューブの内部空間で反応させると、 Mo_4S_4 超原子が Cl 原子を介して結合した超原子層が成長することを発見した。数ナノメートル径の一次元ナノ空間で化学反応を起こすことにより、欠陥や乱れの少ない $\text{Mo}_8\text{S}_8\text{Cl}_{11}$ の単層が形成する(Advanced Materials (2004))。また、独自のテンプレート反応によって Mo_4S_4 クラスターがシート状に配列した超原子層の合成に成功した。

また吾郷グループは化学蒸着法により二次元半導体である二硫化モリブデン(以下、 MoS_2)のナノリボンを基板上に高密度に成長させる方法を新たに開発し、ナノスケールの電気化学的な測定を通じて、ナノリボンの端(エッジ)が中心部の 100 倍近い触媒活性を示すことを見出した(Science Advances (2024))。白金に替わる水素発生触媒として注目されている MoS_2 の活性サイト(エッジ)を有効に活用する画期的な手法である。

末永グループは、これまで取り組んできた電子分光のエネルギー分解能向上の結果として、電子線による分子振動マッピング法を独自に開発し、炭素に対する水素と重水素の化学結合の振動数の違いを識別した。有機材料中に存在する重水素標識分子の空間分布を数ナノメートルの分解能で可視化することに成功した(Nature Nanotech. (2025))。本技術により、有機材料の精密な構造解析が可能となり、高性能かつ高機能な材料の開発が加速すると期待できる。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Z. Ma, P. Solís-Fernández, K. Hirata, Y.-C. Lin, K. Shinokita, M. Maruyama, K. Honda, T. Kato, A. Uchida, H. Ogura, T. Otsuka, M. Hara, K. Matsuda, K. Suenaga, S. Okada, T. Kato, Y. Takahashi, H. Ago, "Lattice-guided growth of dense arrays of aligned transition metal dichalcogenide nanoribbons with high catalytic reactivity" *Science Advances*, **11**, eadr8046 (2025).
- 2) H. Yi, P. Solís-Fernández, Y.-C. Lin, K. Suenaga, H. Ago, "Bottom-up confined synthesis of air-stable two-dimensional SnS and SnS₂ between hexagonal boron nitride nanosheets, *ACS Appl. Nano Mater.*, **8**, 2693 (2025).
- 3) S. Emoto, H. Kusunose, Y.-C. Lin, H. Sun, S. Masuda, S. Fukamachi, K. Suenaga, T. Kimura, H. Ago, "Synthesis of Few-Layer Hexagonal Boron Nitride for Magnetic Tunnel Junction Application", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 31457 (2024).
- 4) R. Senga, K. Hagita, T. Miyata, HF Wang, K. Mayumi, H. Jinnai and K. Suenaga, "Nanoscale C–H/C–D mapping of organic materials using electron spectroscopy", *Nature Nanotechnology* (2025) doi.org/10.1038/s41565-025-01893-5
- 5) Y. Nakanishi, N.Kanda, M. Aizaki, K. Hirata, Y. Takahashi, T. Endo, Y-C Lin, R. Senga, K. Suenaga, S. Aoyagi, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Y. Miyata, and Z. Liu "Superatomic Layer of Cubic Mo_4S_4 Clusters Connected by Cl Cross-Linking" *Advanced Materials* **36**, 2404249 (2024)