

# 次世代への持続可能なライフスタイルのための 機能性非金属軽元素材料の開発

Development of High-Functional Non-Metal Light Element Materials for a Next-Generation Sustainable Life Style



准教授 佐藤 義倫  
Associate Professor  
Yoshinori Sato

ナノ物質の機能を最大限に活かした高次機能性を持つ集合体・複合材料・有機/無機ハイブリット材料を創成することは、最も魅力的な研究の1つである。本研究室では、表面・界面設計に基づいて、ナノ物質の特性をバルクまで持ち合わせた集合体・複合材料・有機/無機ハイブリット材料の設計・合成・評価を行い、「持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals: SDGs)」にも関わる次世代のクリーンエネルギー分野に必要な軽量かつ高機能なエネルギー材料 (特に非金属軽元素材料) の創成に挑戦している。研究を遂行するにあたり、軽元素のホウ素、炭素、窒素、酸素、フッ素、硫黄、リンを用いた高機能な表界面を持つ非金属軽元素材料の開発を行っている (Fig.1)。

Our laboratory is in the research area of advanced nanomaterials for clean energy (alternative energy and hydrogen energy). To fabricate, assemble, and composite organic/inorganic materials with high-performance functions created from combinations of each material's properties is one of the most fascinating and necessary areas of research. In this laboratory, we design, synthesize, and characterize the assembly, composites, and organic/inorganic materials based on surface/interface design to apply nanomaterials' properties to bulky materials (Fig. 1). In particular, we have challenged ourselves to create and develop highly functional nonmetal light element materials (carbon-based materials including boron, nitrogen, oxygen, fluorine, sulfur, and phosphorus) with high-performance surfaces and interfaces. Such materials are necessary for the field of next-generation clean energy, which in turn is needed to meet sustainable development goals (SDGs).

## カーボンナイトライドへの硫黄ドーピング

カーボンナイトライド (CN<sub>x</sub>) は尿素やメラニン色素などの窒素含有有機化合物の熱処理によって合成される。その電気物性は半導体特性を持ち、水を分解して水素を発生する光触媒として期待されている。しかし、CN<sub>x</sub> はキャリア密度の改善、太陽光に対する最適バンドギャップの調整が必要である。この問題に対して、我々は尿素と硫黄含有有機化合物を熱処理によって、CN<sub>x</sub> に硫黄ドーピングを行っている (Fig.2)。本研究は、硫黄ドーピングを精密制御することで、硫黄ドーピング CN<sub>x</sub> の電子物性をコントロールすることを目指している。

## 固体高分子形燃料電池に使用する炭素系材料触媒の開発

新しいエネルギーシステムとして、様々な方法で生成でき貯蔵・輸送が可能な水素エネルギーが考えられている。その水素エネルギーの利用で使用されるデバイスとして期待されている固体高分子形燃料電池

## Sulfur doping of carbon nitrides

Carbon nitrides (CN<sub>x</sub>) are synthesized by thermal treatment of nitrogen-containing organic compounds such as urea and melanin pigment. Their electrical properties are semiconducting, and they are expected to be used as photocatalysts for decomposing water to produce hydrogen. However, CN<sub>x</sub> require improvement in carrier density and tuning of their optimal band gap for sunlight. To address this issue, we have doped CN<sub>x</sub> with sulfur via heat treatment of a mixture of urea and sulfur-containing organic compounds (Fig.2). The goal of this study is to control the electrical properties of sulfur-doped CN<sub>x</sub> by precisely controlling sulfur doping.

## Development of carbon-based material catalysts for use in polymer electrolyte fuel cells

Hydrogen energy is a candidate for a new alternative energy system because hydrogen molecules can be generated from various resources, stored, and transported. Although hydrogen energy-harnessing polymer

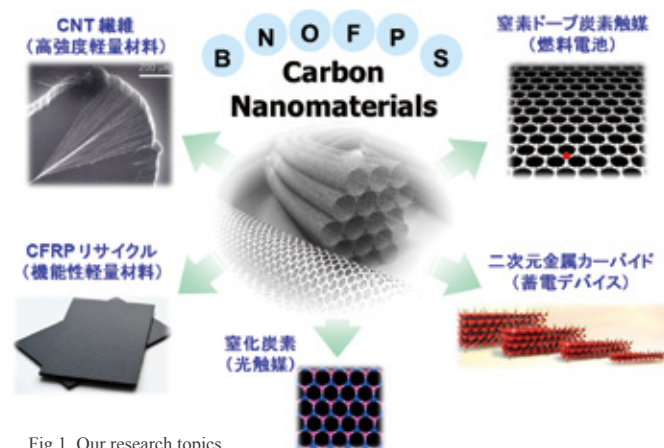


Fig.1 Our research topics.

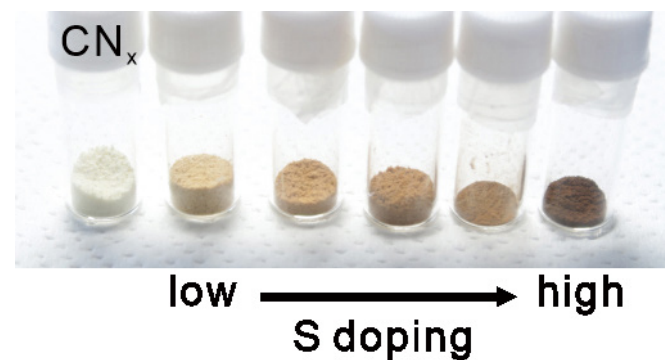


Fig.2 Photograph of sulfur-doped CN<sub>x</sub>. As the amount of sulfur doping increased, the color of the sample changed to blackish brown.

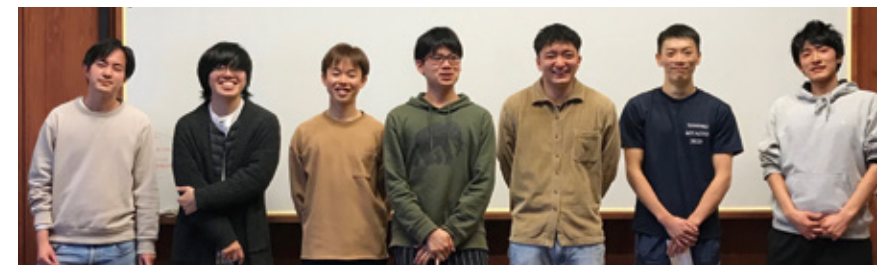


Fig.S1 Lab members (2021).



Fig.S2 New crew. Kyosuke Miyamoto (B3).

(polymer electrolyte fuel cell: PEFC) は、様々な課題のため広い普及には至っていない。その課題の1つが酸素還元反応 (oxygen reduction reaction: ORR) 触媒として使用されている白金触媒である。白金は埋蔵量が少なく、寿命が短い。そこで、白金を使用しない炭素ナノ材料触媒が埋蔵量や耐久性の点で注目されている。特に窒素ドーピング炭素ナノ材料は高い触媒活性を示す。しかし、そのメカニズムは解明されておらず、高活性な ORR 触媒に求められる条件を満たす触媒を未だに作製できていない。本研究では、窒素ドーピング炭素材料の ORR 触媒活性メカニズムの解明のために、フッ素化-脱フッ素化を経由することにより、様々な窒素種を選択的に炭素材料へドーピングを行っている。

## 2次元チタン化合物 (MXene) の合成と表面化学修飾

PEFC では、負極での水素酸化反応 (hydrogen oxidation reaction: HOR)、正極での ORR によって発電される。電解質には酸性水溶液が使用されるため、耐酸性の電極触媒が要求される。2次元材料 MXene は、遷移金属 (Ti, V, Nb, Mo) と非金属軽元素 (C, N) から構成される層状化合物である。Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> は代表的な MXene であり (Fig.3)、耐酸性に優れている。本研究では、高性能な HOR 触媒や ORR 触媒を目指し、Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> の化学表面修飾によって電子物性の変調を行っている。

## 研究費

- JSPS 科学研究費補助金 18H04145 (基盤研究 (A)/代表)
- JSPS 科学研究費補助金 19K21911 (挑戦的研究 (萌芽)/代表)
- 共同研究費 (ステラケミファ株式会社 / 代表)

## 共同研究

- ステラケミファ株式会社 (研究部)

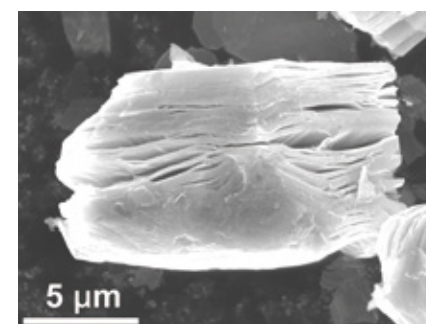


Fig.3 SEM photograph of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXenes.



Fig.4 Pizza party.

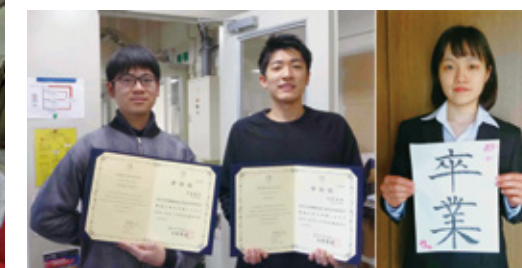


Fig.5 Graduation photo (March 2021). From left, Ryudai Tsukidate (B4), Yuto Sano (B4), and Minoru Kokubo (M2).

electrolyte fuel cells (PEFCs) have been created, they are not yet widely used. Platinum, which is used as an oxygen reduction reaction (ORR) catalyst, is an expensive and non-abundant resource, and it has poor durability for ORR activity. Therefore, metal-free carbon nanomaterials have been developed as alternative platinum catalysts. Nitrogen-doped carbon nanomaterials have been reported to exhibit especially high ORR catalytic activity. However, the ORR mechanism has not been clarified. To achieve highly efficient ORR activity, doping nitrogen species should be precisely controlled in the carbon framework. In this study, we tried to selectively dope carbon nanomaterials with nitrogen atoms via a fluorination-defluorination process to clarify the ORR catalytic activity mechanism for nitrogen-doped carbon materials.

## Synthesis and surface chemical modification of two-dimensional titanium compounds (MXenes)

PEFCs are operated by hydrogen oxidation reaction (HOR) at an anode and ORR at a cathode. Since acidic aqueous solutions are used as an electrolyte, acid-resistant electrocatalysts are required. Two-dimensional material MXenes are layered compounds composed of transition metals (Ti, V, Nb, and Mo) and nonmetallic light elements (C and N). Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> is a typical MXene (Fig.3) and has excellent acid resistance. In this study, we modulated the electronic properties of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> using chemical surface modification to achieve high-performance HOR and ORR catalysts.

## Grants

- JSPS KAKENHI 18H04145 (Scientific Research (A)/PI)
- JSPS KAKENHI 19K21911 (Challenging Research (Exploratory)/PI)
- Collaboration grant (STELLA CHEMIFA Corporation/PI)

## Collaborators

- STELLA CHEMIFA Corporation (Research Division)