

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 with clean energy (alternative energy and hydrogen energy). Fabricating, assembling, and compositing organic/inorganic materials with high-performance functions, which are created from a combination of each material's properties, is one of the most fascinating and necessary research areas. In our laboratory, we design, synthesize, and characterize the assembly, composites, and organic/inorganic materials based on surface/interface design to expand nanomaterials' properties to those of bulky materials (Fig. 1). In particular, we have challenged ourselves to create and develop high functional non-metal light element materials (carbon-based materials including boron, nitrogen, oxygen, fluorine, sulfur, and phosphorus) with high-performance surfaces and interfaces, which are necessary for the field of next-generation clean energy to meet the Sustainable Development Goals (SDGs).

フッ素化-脱フッ素化を経由した炭素材料への異種軽元素や欠陥の制御ドーピング

sp² 混成軌道の共有結合を持つ炭素材料のベーサル面 (網面) は化学的に安定であるが、軽元素 (ホウ素、窒素、酸素、フッ素、硫黄、リン) や空孔欠陥がベーサル面にドーピングすると、炭素材料の物性が大きく変化する。本研究室では、フッ素化-脱フッ素化による炭素材料や炭化物材料の表面改質を行っている。例えば、フッ素化炭素材料をアンモニアガス中で熱処理 (300-600°C) することによって、窒素がドーピングした炭素材料を合成できる (Fig.2)。窒素ドーピングは以下のようなメカニズムを考えている: フッ素化炭素材料が熱処理されると同時に、フッ素基が骨格炭素を伴いながら、フッ化炭素として脱離する。アンモニアが反応して窒素原子が空孔欠陥に生じた活性な炭素原子と反応し、窒素が炭素骨格にドーピングされる。本研究は、フッ素化-脱フッ素化を精密制御することで、炭素材料の表面と物性をコントロールすることを目指している。

Control doping of non-metal light elements and defects for carbon nanomaterials via fluorination-defluorination process

The basal plane of carbon materials with sp²-hybridized covalent bonds is chemically stable. However, when vacancy defects and non-metal light elements, such as boron, nitrogen, fluorine, sulfur, and phosphorus, are introduced in the basal plane, their chemical and physical properties change drastically. In our study, by reacting fluorinated carbon nanomaterials with ammonia gas at 300-600 °C, we succeeded in synthesizing nitrogen-doped carbon nanomaterials (Fig.2). The nitrogen-doping mechanism is as follows: when fluorinated carbon nanomaterials are heated, fluorine groups are detached from the carbon structure along with the carbon atoms to produce carbon fluorides. Moreover, vacancy defects are formed by this process. Because the edges of the resulting vacancy defects are energetically active, the active carbon atoms at the edges react with ammonia and nitrogen atoms are introduced into the carbon frame. We attempt to control the surficial, chemical, and physical properties of carbon nanomaterials by controlling the fluorination-defluorination process.

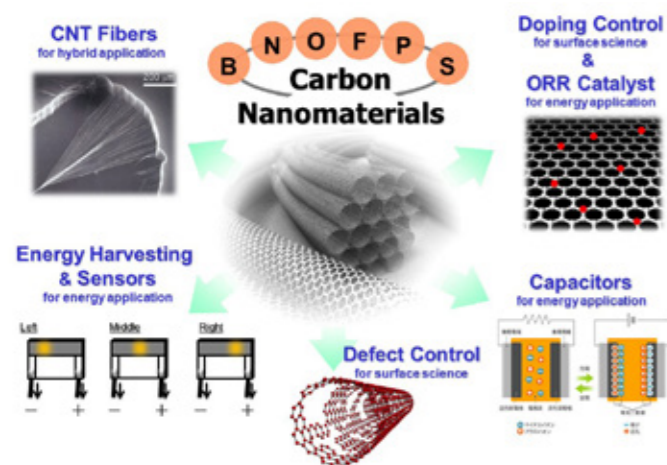


Fig.1 Our research topics.

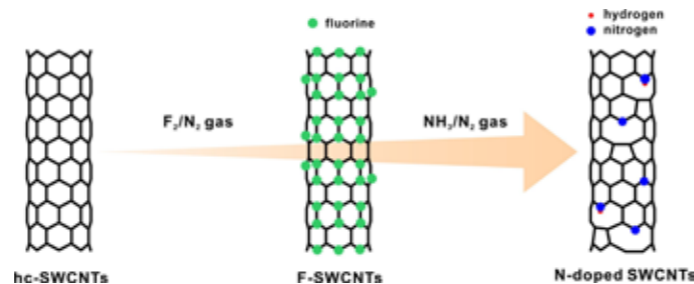


Fig.2 Illustration of nitrogen doping to single-walled carbon nanotubes via fluorination-defluorination process.



Fig.S1 Lab members (2020).



Fig.S2 B4 graduation photo (March 2020).
Yuichi Ito (left) and Yota Sakamoto (right).



Fig.S3 New crews. Ryutaro Nakata (left) and Hiromu Morita (right).

白金族フリー酸素還元反応触媒の設計と創製

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燃料電池 (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することを行っている (Fig.3)。

Design and fabrication for platinum-free oxygen reduction reaction catalysts

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 electrolyte fuel cells (PEFCs) have been anticipated, they have not yet been 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 try to dope nitrogen atoms to carbon nanomaterials selectively via a fluorination-defluorination process to clarify the mechanism of ORR catalytic activity for nitrogen-doped carbon materials (Fig. 3).

学術会議

- ・小久保 美乃里、第 43 回フッ素化学討論会 (ポスター発表 オンライン)

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)

Academic conference

- ・Minori Kokubo, The 43rd Fluorine Conference of Japan (Poster online)

Grants

- ・JSPS KAKENHI 18H04145 (Scientific Research (A)/PI)
- ・JSPS KAKENHI 19K21911 (Challenging Research (Exploratory)/PI)
- ・Collaboration grant (Stella Chemifa Corporation/PI)

Collaborations

- ・Stella Chemifa Corporation (Research Division)



Fig.3 Tuning factors for efficient ORR catalytic activity of nitrogen-doped carbon materials.



Fig.4 Drinking party.



Fig.5 Pizza party.