

## 新規固体触媒で実現する革新的な CFRP リサイクル技術

— 低温・短時間で高品質炭素繊維を回収、持続可能な資源循環と高機能材料創製に貢献 —

### 【発表のポイント】

- 本研究グループで開発した活性水酸アパタイト（\*1）系酸化触媒を用いることで、低温・短時間で炭素繊維強化プラスチック（CFRP）（\*2）の樹脂部分のみを酸化分解除去し、炭素繊維をダメージなく回収する技術開発に成功
- 新規固体触媒（\*3）により、無溶媒・低環境負荷の革新的リサイクルプロセスを開発
- CFRP 廃材の高付加価値再利用により、持続可能な材料利用へ貢献できる資源循環と高機能材料創製をつなぐ新技术として期待

### 【概要】

名古屋工業大学生命・応用化学類の白井孝教授、辛韵子特任准教授、後藤舞氏（研究当時：工学部生命・応用化学科）らの研究グループは、固体触媒を用いた炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の新規低温リサイクル技術を開発しました（図1）。本研究では、独自に開発した活性水酸アパタイトと多結晶白金ナノ粒子（\*4）を固体触媒として用いることで、エポキシ樹脂のみを選択的に分解し、炭素繊維にダメージを与えることなく高品質で回収する技術開発に成功しました。

本手法は、400°C以下・20分以内という低温・短時間条件下で進行し、有機溶媒を一切使用しない環境調和型プロセスである点に特徴があります。また、二段階の熱分解プロセスにより、樹脂成分を完全に酸化分解させると同時に、炭素繊維の構造や物性を保持したまま再資源化できることを明らかにしました。さらに、固体触媒を活用した低環境負荷プロセスとして、今後の持続可能な材料設計およびグリーンケミストリーの発展にも寄与することが期待されます。

本研究の詳細は、2026年4月9日（イギリス時間）に英国王立化学会の学術雑誌 *Green Chemistry* に掲載されました。

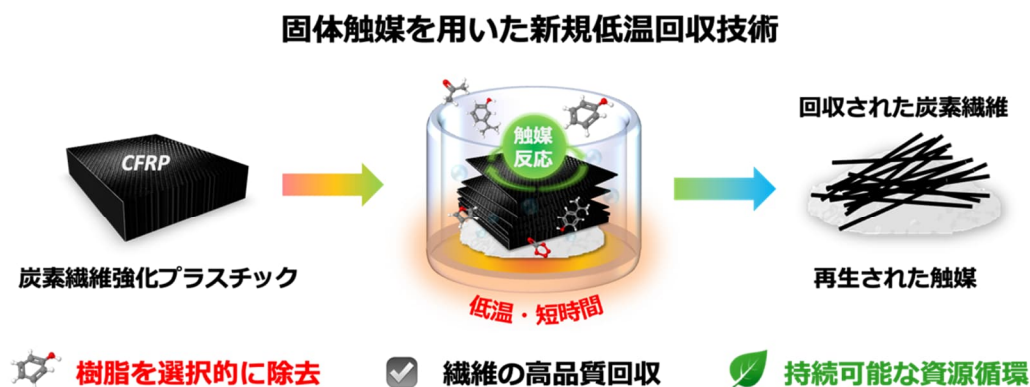


図1 本研究により開発された新規固体触媒を用いた革新的 CFRP リサイクル技術

## 【研究の背景】

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、軽量で高強度、高剛性、耐食性に優れることから、航空機、自動車、風力発電機器、スポーツ用品など幅広い分野で利用が拡大しています。近年、脱炭素社会の実現に向けて、輸送機器の軽量化による省エネルギー化が求められており、CFRP の重要性はますます高まっています。一方で、CFRP は炭素繊維と熱硬化性樹脂から構成される複合材料であるため、使用後のリサイクルが難しいという課題があります。特に、炭素繊維は高い付加価値を有する材料であるにもかかわらず、現在は使用済み CFRP の多くが埋立て処分されており、資源循環と環境負荷低減の観点から深刻な問題となっています。これまで、CFRP から炭素繊維を回収する方法として、機械粉碎、溶媒分解、電気化学的処理、熱分解などが検討されてきました。しかし、機械的手法では短い炭素繊維しか回収できないうえ、繊維が損傷しやすく、溶媒分解法 (\*5) では高温・高圧条件や大量の有機溶媒が必要となるなど、コスト面、環境面で問題点があります。また、工業的に利用が検討されている熱分解法 (\*6) では、高温加熱処理に伴う炭素繊維表面の酸化によるダメージやエネルギー消費の増大が課題となっています。これら CFRP のリサイクル、すなわち CFRP からの炭素繊維の回収を困難にしているのが、CFRP が炭素繊維を樹脂で固めた複合材料である点です。構成要素である炭素繊維も樹脂も熱に弱く、樹脂のみを酸化分解等により除去しようとした場合、炭素繊維も同時に表面が酸化され、機械的強度など諸特性が低減してしまい、その再利用が難しくなる問題点がありました。

このような背景から、炭素繊維の品質を維持したまま、より低温・短時間かつ低環境負荷で CFRP をリサイクルできる新しい手法の開発が強く求められています。

## 【研究の内容・成果】

本研究では、本研究グループで開発した活性水酸アパタイト (Hydroxyapatite, HAp) および多結晶白金ナノ粒子担持 HAp (pc-PtNPs@HAp) を固体触媒 (図 2) として用い、CFRP 中の樹脂成分のみを選択的に分解する新しいリサイクル手法を開発しました。HAp は、地球上に多く存在するカルシウムとリン酸から構成され、生体骨の主成分としても知られる安全かつ安価な材料です。これまで本研究グループでは、HAp 表面の熱誘起ラジカル (\*7) および酸塩基特性を利用することにより、機能性酸化触媒としての有用性を見いだしてきました。また、本研究で用いた多結晶白金ナノ粒子 (pc-PtNPs) は、本研究室で独自に開発したマイクロ波急速加熱法により合成されたものであり、平均粒径約 5 nm の多結晶構造を有し、結晶界面に由来する優れた酸化能を有するため、従来の白金ナノ粒子と比べ、ごく少量の担持量で良好な触媒特性を発現します。本回収プロセスは、アルゴン雰囲気下での一次分解と、酸素雰囲気下での二次分解からなる二段階熱処理により構成されています。一次分解では、本触媒表面の特徴的な酸塩基サイトを利用し、約 300~400°C の低温条件において、CFRP の構成要素であるエポキシ樹脂が選択的に分解され、揮発成分の生成とともに炭化残渣 (チャー/タール) が形成されます。続く二次分解では、本触媒表面における活性酸素種の生成により、残留された炭化残渣が CO<sub>2</sub> や H<sub>2</sub>O などへと効率的に酸化分解されます。この結果、炭素繊維表面に付着した樹脂が完全に除去され、炭素繊維構造を損なうことなく回収できることを見いだしました。特に、PtNPs@HAp は HAp より高い触媒活性を示し、400°C で 20 分以内という短時間で完全な分解を達成しました。回収された炭素繊維および CFRP の SEM 像を図 3 に示します。CFRP (図 3ab) と比較すると、図 3cd に示した pc-PtNPs@HAp 触媒を用いた場合、炭素繊維表面に樹脂の残存は認められず、損傷のない独立した繊維が回収されていることがわかります。一方、HAp 単体を用いた場合には、炭素繊維表面にわずかな樹脂残存が確認されました (図 3ef)。また、比較試料として触媒能のないアルミナ粉体 (図 3gh) を用い

た場合には、繊維間に樹脂が残存し、単一繊維としてではなくシート状でしか回収できないことが確認されました。

図 4 に CFRP 作製時の炭素繊維および pc-PtNPs@HAp 触媒により回収された炭素繊維のラマン分光解析結果を示します。図 4a および図 4b の比較より、回収後の炭素繊維は元の繊維と同等の構造を維持していることが確認されました。ラマン分光法による構造解析結果は、弾性率や引張強度などの機械特性と強く関連することが知られているため、本研究で回収された炭素繊維は元の繊維と同等の品質を保持していると考えられます。さらに、本触媒は反応過程において自己再生される特性を有しており、繰り返し使用が可能です。また、形状自由度の高い固体触媒であることから、長尺の CFRP 構造体にも適用可能であり、長尺の炭素繊維も、その繊維形状を維持したまま回収できる点も本手法の大きな特徴です。

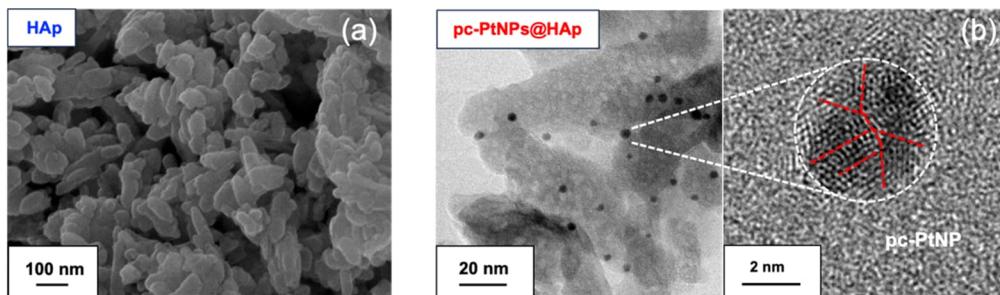


図 2 本研究で使用された固体触媒の形態

(a) HAp の SEM 像

(b) 多結晶白金ナノ粒子担持 HAp (pc-PtNPs@HAp) の HR-TEM 像

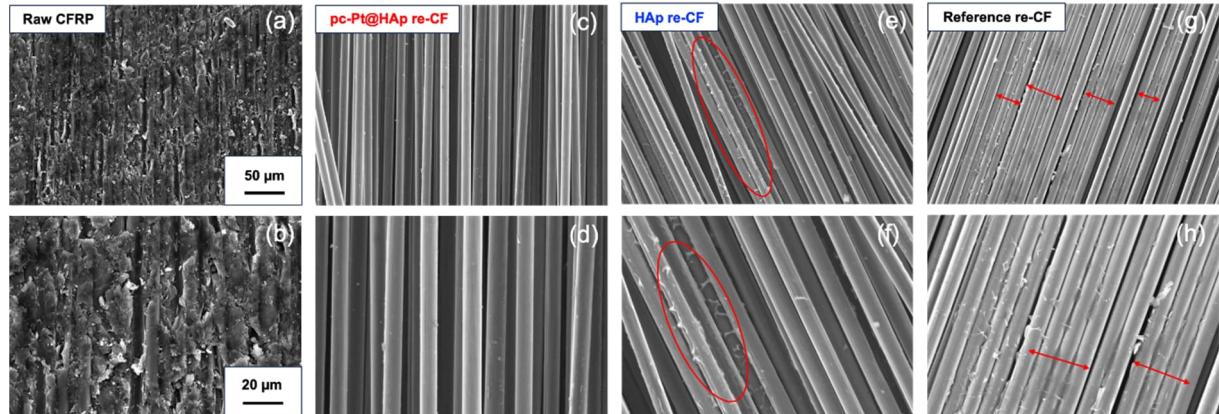


図 3 SEM により観察された各試料の表面状態。

(a) 熱処理前の CFRP

(b) 多結晶白金ナノ粒子担持 HAp 触媒を用いた回収炭素繊維

(c) HAp 触媒を用いた回収炭素繊維

(d) 比較試料のアルミナ粉体を用いた回収炭素繊維

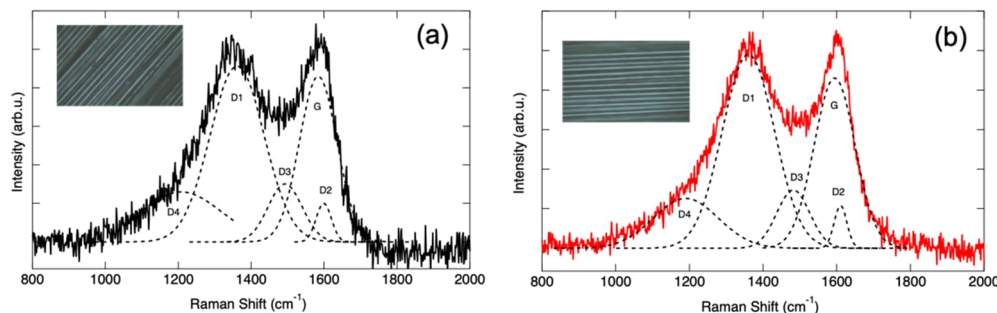


図4 CFRPに用いた炭素繊維(a)と、多結晶白金ナノ粒子担持HAp触媒により回収された炭素繊維(b)のラマンスペクトルおよび炭素繊維の光学顕微鏡像。

### 【社会的な意義】

本研究で開発した活性水酸アパタイトおよび多結晶白金ナノ粒子を固体触媒として用いた、新規CFRPリサイクル技術は、CFRP中の樹脂成分のみを選択的に分解する新しいリサイクル手法として、今後の持続可能なCFRP製品の開発に非常に有用と考えられます。炭素繊維を高品質のまま回収できる点に加え、触媒自体がプロセス中に再生されるため、連続的かつ高効率な運用が可能であるという利点があります。さらに、本手法は固体触媒を用いるため、従来の溶媒系プロセスと異なり、長尺の炭素繊維にも適用可能であり、繊維形状を維持したまま回収できる点で、実用化において大きな優位性があると見込まれます。

これらの特長は、航空機や自動車産業などで求められる高性能CFRP材料の再利用において極めて重要であり、資源の有効利用と廃棄物削減の両立に大きく貢献します。さらに、本技術は有機溶媒を使用しない環境調和型プロセスであることから、CO<sub>2</sub>排出削減や環境負荷低減にも寄与し、脱炭素社会および循環型社会の実現に向けた基盤技術となることが期待されます。

### 【今後の展望】

今後は、触媒の耐久性および再利用性のさらなる向上に加え、地球資源的に豊富な元素を用いた触媒設計を進めることで、持続可能性および経済性の一層の向上を目指します。

さらに、本研究で提案した固体触媒を用いた低温分解プロセスの概念は、他の複合材料や高分子材料のリサイクルにも展開可能であり、資源循環型社会の実現に向けた新たな材料プロセスの創出につながることを期待されます。

### 【用語解説】

#### (\*1) 活性水酸アパタイト

水酸アパタイトは、アパタイト構造を有するリン酸カルシウムの総称であり、化学量論型HApは化学式Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>の組成を持ち、Ca/P (CaとPのモル比)は1.67となります。様々な用途に用いられる機能性セラミックス材料として知られており、例えば優れた有機親和性、高い吸着能およびイオン交換能を利用した、人工骨・人工歯根といったバイオセラミックス、高速液体クロマトグラフィー用充填剤、除タンパク材、抗菌剤担体などに広く利用されています。

本研究では、Ca/P比や表面酸塩基特性等を制御し、触媒としての活性を高めたHApを用いました。

(参考：<https://www.nitech.ac.jp/news/press/2020/8465.html>)

#### (\*2) 炭素繊維強化プラスチック (CFRP)

軽くて強い炭素繊維を樹脂で固めた複合材料です。高い強度と剛性を持ちながら軽量で、耐食性や耐

疲労性にも優れています。そのため航空機や自動車、スポーツ用品などで広く利用されている先進的な材料です。

#### (\*3) 固体触媒

固体のまま化学反応を速める物質（触媒）で、主にその表面で反応が起こります。触媒自体はほとんど変化せず繰り返し使え、分離が容易なため工業的に広く利用されます。

#### (\*4) 多結晶白金ナノ粒子

ナノメートルサイズの白金からなる触媒で、非常に大きな比表面積を持つため高い触媒活性を示します。反応物が表面に吸着しやすく、少量でも効率よく反応を促進できます。自動車の排ガス浄化や燃料電池などに利用され、環境・エネルギー分野で重要な役割を果たしています。本研究では、マイクロ波加熱による特異な反応を利用した多結晶構造を有する高活性白金ナノ粒子を用いました。

#### (\*5) 溶媒分解法

CFRP 中の樹脂を有機溶媒や水熱条件下で分解し、炭素繊維を高品質に回収できる点が特徴です。繊維の強度低下が少なく再利用性に優れますが、高温高压設備や溶媒の回収・管理が必要でコストが高く、処理条件の最適化が課題とされています。

#### (\*6) 熱分解法

CFRP を高温で加熱して樹脂を分解し、炭素繊維を回収する方法で、大量処理が可能で実用化が進んでいます。一方で、高温処理により繊維表面が損傷し強度が低下する恐れや、エネルギー消費が大きい点、分解ガス処理が必要な点が課題とされています。

#### (\*7) 熱励起ラジカル

熱により励起された対電子をもつ原子や分子、あるいはイオンを差します。

### 【論文情報】

論文名 : Reclaiming carbon fibres: a green catalytic route for low-temperature CFRP recycling

著者名 : Yunzi Xin, Mai Goto, and Takashi Shirai\* (\*責任著者)

掲載雑誌名 : *Green Chemistry* (IF : 9.1)

公表日 : 2026年4月9日 (イギリス時間)

URL: <https://doi.org/10.1039/D5GC06006K>

### 【本件への問い合わせ先】

<研究に関すること>

名古屋工業大学 生命・応用化学類

教授 白井 孝

TEL : 052-735-7536

E-mail : shirai@ni-tech.ac.jp

<広報に関すること>

名古屋工業大学 企画広報課

TEL : 052-735-5647

E-mail : pr@adm.nitech.ac.jp