



## Press RELEASE ご取材案内

配布先：文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会  
原子力規制委員会記者控室、茨城県政記者クラブ  
報道各社：科学部・社会部 ご担当者各位

2026年4月13日

早稲田大学  
日本原子力研究開発機構  
東京大学 アイソトープ総合センター  
東京大学 生産研究所  
名古屋大学

## 自然界には存在しない構造を持つ 2次元酸化鉄の作製に成功

～グラフェン/SiC 界面が生み出す新物質～

### 【発表のポイント】

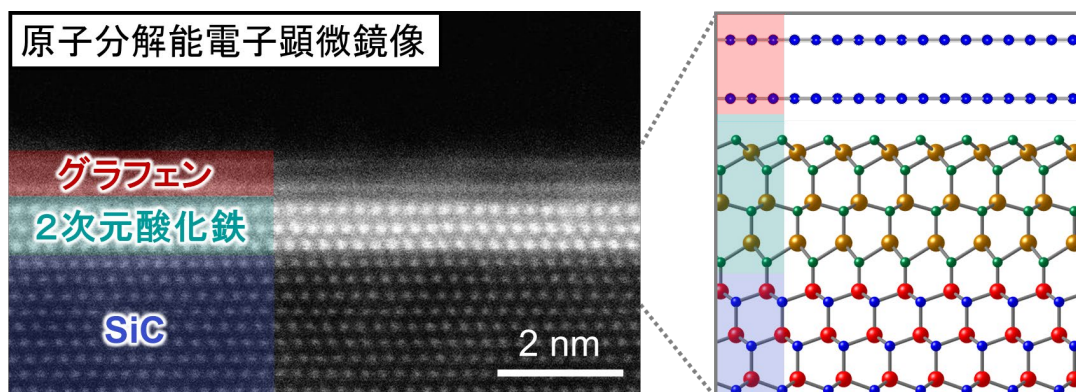
- 自然界には安定に存在しない構造を持つ 2次元酸化鉄の作製に成功しました。
- 2次元物質のグラフェンと3次元物質のSiCの界面に鉄と酸素を導入する新たな手法により、この2次元酸化鉄作製を実現しました。
- スピントロニクスデバイスなどへの応用が期待され、さらに他の2次元遷移金属酸化物に展開することによって新たな量子物性の開拓につながる可能性があります。

早稲田大学の乗松航（のりまつ わたる）教授、物質・材料研究機構（NIMS）の榊原涼太郎（さかきばら りょうたろう）博士（研究当時名古屋大学所属）、日本原子力研究開発機構の寺澤知潮（てらさわ ともお）研究副主幹、東京大学の河内泰三（かわうち たいぞう）技術専門職員、福谷克之（ふくだに かつゆき）教授、名古屋大学の伊藤孝寛（いとう たかひろ）准教授の研究グループは、自然界には存在しない構造を持つ 2次元酸化鉄の作製に成功しました。

酸化鉄<sup>※1</sup>は、様々な組成・構造を持つものが存在し、例えば、スピネル構造を持つマグネタイト  $Fe_3O_4$  は紀元前から鉄につく磁石として知られており、コランダム型構造を持つヘマタイト  $Fe_2O_3$  は主要な鉄鉱石でありヘモグロビンと同様の由来を持つ名前が示すように赤い顔料として用いられています。

当グループは、2次元物質<sup>※2</sup>であるグラフェンと、3次元物質である炭化ケイ素（SiC）基板の界面<sup>※3</sup>に、2次元的な構造を持つ酸化鉄を作製する方法を発見しました。さらに、形成された2次元酸化鉄を原子レベルで構造解析した結果から、この界面物質は自然界には存在しない構造を持つ酸化鉄であることを明らかにしました。本研究成果は、界面を利用することで従来の化学平衡では実現できなかった新しい構造を作り出す手法を示した点で重要です。

本成果は、2026年3月14日付けで、Wiley社が発行する学術誌『Small Methods』誌に掲載されました。





## キーワード：

2次元酸化鉄、界面、グラフェン、SiC

### (1) これまでの研究で分かっていたこと

遷移金属酸化物は、絶縁体から金属、超伝導体まで多彩な電子物性を示す材料として知られています。その中で本研究では、地球上に最も豊富に存在する遷移金属元素である鉄 (Fe) とその酸化物に注目しました。鉄は、3d 軌道の電子によるスピン分極のために強磁性体 (磁石) として知られています。同様に酸化鉄でも、スピネル構造を持つマグネタイト  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  は古くから磁石として用いられてきました。酸化鉄はマグネタイト以外にも、塩化ナトリウム型構造を持つウスタイト  $\text{FeO}$  やコランダム型構造を持つヘマタイト  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  など様々な構造を持ち、構造によって物性が大きく異なることが知られています。そのため、新しい構造を持った酸化鉄材料の探索は、基礎・応用の両側面で意義深いと言えます。

ここで、グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドなどの2次元物質は、構造の2次元性に起因して、3次元物質にはない物性や機能について、非常に活発に研究されています。その中でも、2次元物質グラフェンと3次元物質である基板の界面は、特異な現象の生じる場として注目されています。例えば、グラフェン/SiCヘテロ構造を作製し、水素雰囲気ガス中で加熱すると、水素がグラフェンとSiCの界面に侵入するインターカレーション<sup>\*4</sup>と呼ばれる現象が生じます。このインターカレーション現象を、水素以外の元素やその化合物へと拡張することで、グラフェンとSiCの界面において、例えば2次元の窒化ガリウム (GaN) や2次元の酸化インジウム (InO) といった2次元半導体を作製できることが報告されてきました。このような背景の中で、インターカレーションによる2次元の酸化鉄の作製にも大きな期待が寄せられてきました。しかしながら、鉄は炭素やケイ素との反応性が非常に高く、先行研究と同様のアプローチでは鉄の炭化物やケイ化物が優先的に形成されてしまうため、2次元酸化鉄の形成はこれまで実現されていませんでした。

### (2) 新たに実現しようとしたこと、明らかになったこと

2次元酸化鉄を作製する手法を確立できれば、これまでにない物性や機能を持った材料の実現が期待されます。そこで本研究では、グラフェン/SiC界面を、新たな2次元物質を形成するための結晶成長場とみなし、インターカレーション現象を利用することで2次元酸化鉄の作製を目指しました。実験と解析の結果、グラフェンの2次元性とSiCの結晶構造を反映して、自然界には存在しない構造を持つ2次元酸化鉄が形成することを見出しました。また、得られた2次元酸化鉄は室温では常磁性を示す一方で、低温 (100 K) では反強磁性秩序を持つことが示唆されました。

様々な物質をグラフェン/SiC界面にインターカレーションする際、まずグラフェンとほとんど同じ構造を持つバッファ層と呼ばれる炭素原子層をSiC上に形成します。従来では、このバッファ層上に真空中で元素を堆積させ、そのまま加熱するというアプローチがとられてきました。これは、加熱中に酸素が存在すると、グラフェン/SiC界面に酸素が優先的にインターカレーションしたり、グラフェン中の炭素と反応して $\text{CO}_2$ として分解されるためグラフェンがなくなってしまうためです。しかしながら、この手法を鉄に適用した場合、鉄が炭素やケイ素と優先的に反応して、グラファイトやケイ化物が不均一に形成されてしまいます (図1)。

そのため、鉄やその化合物に関するインターカレーションの報告はこれまでほとんどありませんでした。それに対して本研究では、バッファ層上に真空中で鉄を蒸着したあと、試料をあえて一旦大気中に曝露したのち、再び真空中に導入して加熱処理を行うことで、酸化鉄のインターカレーションが起こり、グラ

フェンと SiC の界面に 2 次元酸化鉄が形成することを見出しました (図 1)。

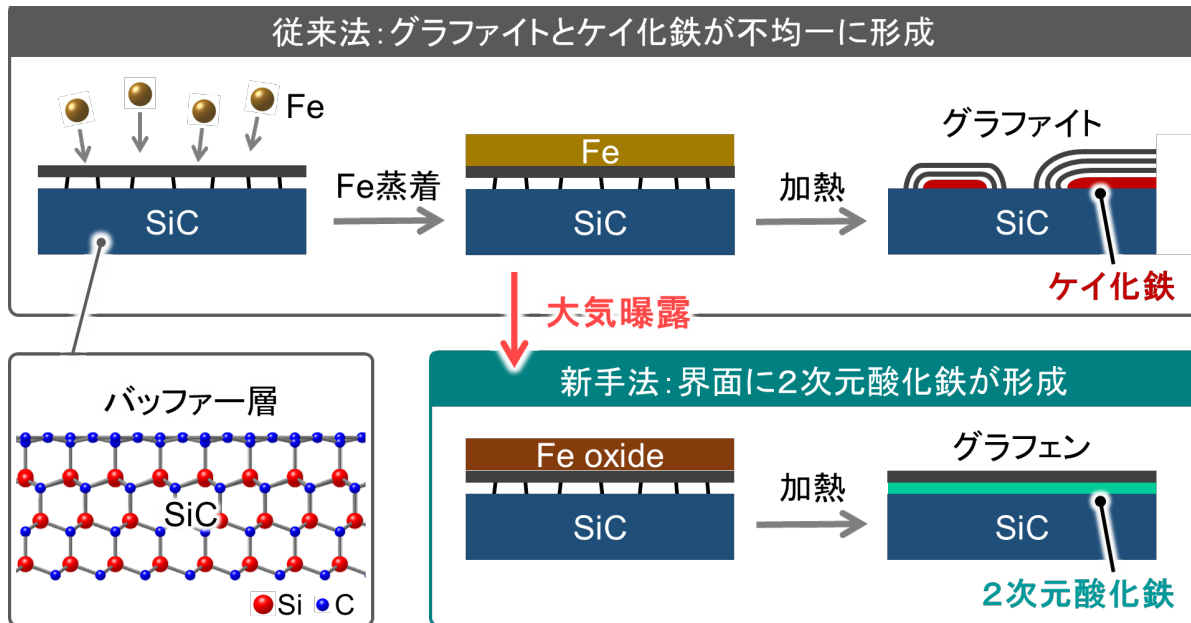


図 1 インターカレーションによる 2 次元酸化鉄の作製方法

これらの、従来法と新手法で得られた試料断面の原子分解能電子顕微鏡像を図 2 に示します。従来法では、鉄が SiC と反応することにより多層グラフェンとケイ化鉄 (Fe silicide) が不均一に形成されました。一方、新手法で作製した試料の高角環状暗視野走査透過型電子顕微鏡 (HAADF-STEM) 像では、グラフェンと SiC の界面に、矢印で示すような一様な輝点の周期配列が見られました。HAADF-STEM 像では、原子番号の大きい元素ほど明るく観察されます。この界面の輝点領域において電子エネルギー損失分光による元素分析を行った結果、そこには鉄と酸素が含まれていることから、グラフェンと SiC の界面に酸化鉄の 2 次元結晶が形成されたことがわかりました。

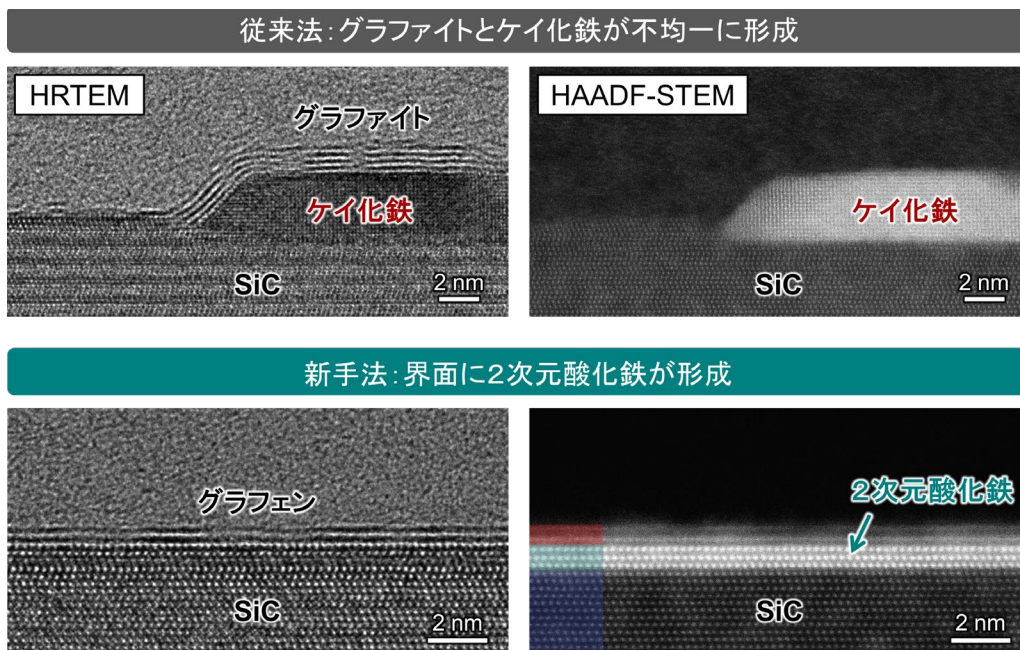


図 2 従来法と新手法での高分解能透過型電子顕微鏡 (HRTEM) 像と高角環状暗視野走査透過型電子顕微鏡 (HAADF-STEM) 像

形成された 2 次元酸化鉄がどのような原子配列を持っているのかを明らかにするために、第一原理計算によって最適化されたいくつかの構造モデルに基づいて HAADF-STEM シミュレーション像を計算し、図 3 に示すように実験結果と対応させました。その結果、SiC の直上では、Fe と O が SiC と同じ四面体構造を持っていること、グラフェンの直下では、塩化ナトリウム型の八面体構造を持っているものとして矛盾なく説明できることがわかりました。このような構造を持つ酸化鉄は、我々の知る限り報告されておらず、グラフェン/SiC 界面に形成された 2 次元酸化鉄は、自然界には存在しない構造を持つことが明らかとなりました。2 次元酸化鉄がこのような特異な構造をとる理由は、SiC 直上では鉄と酸素が SiC と同じ四面体構造の配列を取る一方で、その上側では塩化ナトリウム型構造のウスタイト構造へと緩和することによると考えられます。

このような構造を持つ 2 次元酸化鉄についてメスバウアー分光測定<sup>※5</sup>を行った結果、室温では常磁性を示すのに対して、低温（100 K）では反強磁性秩序を持つことを示唆する結果が得られました。

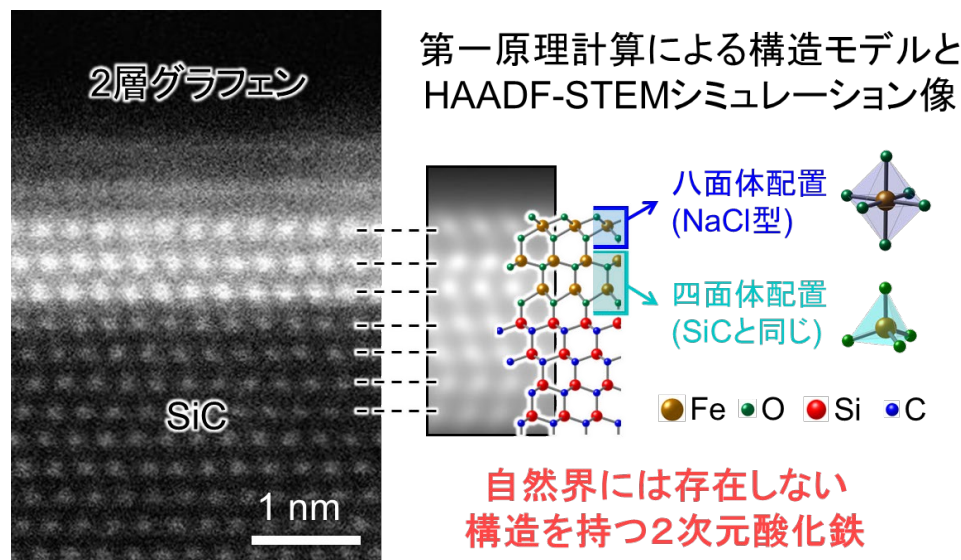


図 3 2 次元酸化鉄の構造解析の結果

### (3) 研究の波及効果や社会的影響

本研究により、2 次元物質であるグラフェンと 3 次元物質である SiC との界面において、自然界には存在しない構造を持つ 2 次元酸化鉄を作製できることが明らかになり、また、メスバウアー分光測定により、この 2 次元酸化鉄は冷却に伴って常磁性から反強磁性への磁気相転移を示すことが示唆されました。これらの結果は、スピントロニクスや低次元磁性などへの応用が期待されます。

酸化鉄を含む遷移金属酸化物には、高温超伝導を示す銅酸化物や、強相関電子系のマンガン酸化物などがあり、機能の宝庫と呼ばれています。本研究の方法論によって、これらの様々な遷移金属酸化物をグラフェン/SiC 界面で 2 次元化できれば、より高温での超伝導や巨大磁気抵抗効果といった興味深い特性の発現が期待されるため、基礎研究と応用技術の両側面で様々な波及効果が期待できます。

### (4) 課題、今後の展望

物質の性質や機能は、原則としてその原子配列、すなわち構造によって決まります。これまでに存在しない構造を持つ物質が得られれば、これまでにない物性や機能が現れることが容易に想像されます。よっ



て、本研究で得られた特異な構造を持つ 2 次元酸化鉄特有の新規物性の実証と、その応用技術の開拓が今後の課題です。

## (5) 研究者のコメント

世の中に存在する多くの物質の構造や物性は、これまでの人類のたゆまぬ研究によってほとんど理解されてきたと言っても過言ではありません。そんな現代において、異種物質同士の界面で生じる新物質や新機能の開拓は、今後ますます発展していくと考えています。2 次元グラフェンと 3 次元 SiC の界面で、これまで人類が見たことのない構造を持つ 2 次元酸化鉄が形成されたことはその成果の 1 つです。今後も、界面をキーワードにさらに多くの新物質・新機能の実現へとつなげていきます。

## (6) 用語解説

### ※1 酸化鉄

鉄と酸素の化合物であり、組成・構造によって異なる物性を持つ。例えば、スピネル構造のマグネタイト  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  は磁石として、コランダム型構造を持つヘマタイト  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  は赤色顔料として用いられてきた。これまでに多様な酸化鉄の結晶構造が報告されており、構造によって物性も大きく異なることから、新しい構造を持った酸化鉄材料の探索は基礎・応用の両側面で意義深い。

### ※2 2 次元物質

炭素原子 1 層のみで構成されるグラフェンや、ホウ素と窒素が同一平面内に配列した六方晶窒化ホウ素、遷移金属の原子層がカルコゲンの原子層に挟まれた構造を持つ遷移金属ダイカルコゲナイドなどに代表される物質群の総称。上下方向に共有結合をもたない 2 次元的な構造を持つことにより 3 次元の物質とは異なる物性や機能が見られ、近年大きな注目を集めている。

### ※3 界面

異なる物質同士が接している境界。一般に界面では、通常の物質とは異なる原子配列が現れることが多い。特に 2 次元物質と 3 次元物質の界面は、異種物質の導入や構造制御の可能な 2 次元空間とみなすことができ、新物質を作製する良質な結晶成長場となる。また界面では、互いに接する物質の対称性が自発的に破れることから、新規物性発現の場としても期待される。

### ※4 インターカレーション

SiC 単結晶基板を加熱すると、表面に大面積の単一方位グラフェンが形成する。このグラフェン/SiC 界面には様々な元素を挿入することができ、このような層状物質の界面への原子挿入は一般にインターカレーションと呼ばれる。グラフェンと SiC の界面において、水素、リチウム、銅、ゲルマニウムといった様々な元素のインターカレーションが報告されている。さらに単体だけではなく、窒化ガリウムなどの化合物のインターカレーションも報告されている。酸化物としては酸化インジウムのインターカレーションの報告はあるものの、酸化鉄のような遷移金属酸化物のインターカレーションの報告はこれまでなかった。

### ※5 メスバウアー分光測定



固体試料中の<sup>57</sup>Fe原子核が反跳なしにガンマ線を吸収する「メスバウアー効果」を利用し、原子核周辺の電子状態や磁気的狀態を精密に測定する手法。

### (7) 論文情報

雑誌名 : Small Methods

論文名 : 2D Iron Oxide at the Graphene/SiC(0001) Interface

執筆者名 (所属機関名) : Ryotaro Sakakibara (NIMS), Tomo-o Terasawa (日本原子力研究開発機構)、  
Taizo Kawauchi (東京大学), Katsuyuki Fukutani (東京大学)、Takahiro Ito (名古屋大学)、Wataru  
Norimatsu (早稲田大学)

掲載日時 : 2026年3月14日

掲載 URL : <https://doi.org/10.1002/smtd.202501889>

DOI : doi.org/10.1002/smtd.202501889

### (8) 研究助成

研究費名 : 日本学術振興会 科学研究費助成事業 特別研究員奨励費

課題番号 : 22KJ1535

研究課題名 : インターカレーション法を利用したグラフェン/SiC 界面での二次元超伝導体の作製

研究代表者名 (所属機関名) : 榊原涼太郎 (名古屋大学 : 助成当時)

研究費名 : 日本学術振興会 科学研究費助成事業 若手研究

課題番号 : 25K17917

研究課題名 : 二次元半導体における原子欠陥の理解と制御

研究代表者名 (所属機関名) : 榊原涼太郎 (NIMS)

研究課題名 : 日本学術振興会 科学研究費助成事業 若手研究

課題番号 : 21K14500

研究課題名 : グラフェンにおける水素イオン透過の低速水素イオン照射を用いた機構解明

研究代表者名 (所属機関名) : 寺澤知潮 (日本原子力研究開発機構)

研究費名 : 早稲田大学 各務記念材料技術研究所 環境整合材料基盤技術共同研究拠点共同研究プロジェクト

研究課題名 : 低環境負荷ナノカーボン材料の作製と評価

研究代表者名 (所属機関名) : 乗松航 (名古屋大学 : 助成当時)