

グラフェン超伝導材料の原子配列解明に成功～薄くて柔らかい、原子スケールの2次元超伝導材料の開発に新たな道～

2019年11月14日
東京大学大学院理学系研究科
早稲田大学
日本原子力研究開発機構
高エネルギー加速器研究機構

発表のポイント

- ◆ TRHEPD法を用い、超伝導を示すグラフェンとカルシウムの2次元化合物の原子配列を解明
- ◆ 2次元化合物において電気抵抗がゼロになる超伝導現象を示すことを観測
- ◆ グラフェンを利用した新たな化合物の原子配列解明により、デバイス材料開発への応用を期待

■概要

東京大学大学院理学系研究科博士後期課程3年の遠藤由大（えんどうゆきひろ）および長谷川修司（はせがわしゅうじ）教授、早稲田大学理工学術院の高山あかり（たかやまあかり）専任講師、日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターの深谷有喜（ふかやゆうき）研究主幹、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の望月出海（もちづきいづみ）助教および兵頭俊夫（ひょうどうとしお）ダイヤモンドフェローの研究グループは、これまで未解決だった超伝導を示す炭素原子層物質グラフェンとカルシウムの2次元化合物の原子配列を、全反射高速陽電子回折法（以下、TRHEPD法、トレプト法）という実験手法を用いて世界で初めて決定しました。また、この原子配列が電気抵抗がゼロになる超伝導現象を示すことも実験により明らかにしました。グラフェンを利用した新たな化合物の原子配列を解明したことで、エネルギー損失ゼロの超高速情報処理ナノデバイスなどの材料開発への応用に道を開くものです。本研究成果は、『Carbon』のオンライン版に2019年10月25日（現地時間）に掲載されました。この記事の続きは <https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20191114.pdf> をご覧下さい。

アルミでコンピュータメモリを省電力化する～アルミ酸化膜を用いた新しい不揮発メモリの動作メカニズムを解明～

2019年11月14日
日本原子力研究開発機構
高エネルギー加速器研究機構

■概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（理事長 児玉敏雄）物質科学研究センター多重自由度相関研究グループの久保田正人研究副主幹、国立研究開発法人物質・材料研究機構（理事長 橋本和仁）国際ナノアーキテクトニクス研究拠点の加藤誠一主任研究員、兒子精祐外来研究員及び大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（機構長 山内正則 以下、KEK という）物質構造科学研究所の雨宮健太教授らの研究グループは、次世代不揮発メモリの材料として期待されるアモルファスアルミ酸化膜において、半導体メモリのまったく新しい動作メカニズムを説明する電子状態変化を世界で初めて直接観測でとらえました。

現在、コンピュータの主記憶メモリとして利用されているDRAMは、電源供給がないと記憶の保持ができません。従って、一定時間ごとに記憶を保持する動作（リフレッシュ動作）が必要のために電力消費が大きいという問題を抱えています。この解決のために次世代不揮発メモリの研究が行われています。次世代不揮発メモリの候補として、タンタル酸化物（ Ta_2O_5 ）などの遷移金属酸化物を用いたReRAMが広く研究されています。しかし、一般的に、遷移金属酸化物では、メモリ動作時に遷移金属原子の価数が変わってしまう化学反応が起こります。その結果、副生成物が生じるために、ReRAMが劣化しやすく、書き換え回수에限界があると言われていました。

一方、遷移金属酸化物ではないアモルファスアルミ酸化膜に関して、酸素空孔内への電子の出入りはエネルギー的に安定であるという理論計算を元にして、本研究グループは、アモルファスアルミ酸化膜を用いたReRAMのメモリ動作を説明するための全く新しい「酸素空孔モデル」を提唱しています。このモデルでは、遷移金属ではないアルミニウムを用いているために、メモリ動作時に化学変化を伴わずReRAMの劣化が生じにくいと考えられます。

この酸素空孔モデルを検証するために、KEK物質構造科学研究所の放射光実験施設（フォトンファクトリー）において、アモルファスアルミ酸化膜（ $AlOx$ ）ReRAMの構成元素である酸素とアルミニウムの吸収スペクトル測定を行いました。測定結果では、オン状態とオフ状態で酸素の吸収スペクトルは大きく変化しましたが、アルミニウムの吸収スペクトルは変化しませんでした。この測定結果は、 $AlOx$ -ReRAMでは、メモリ動作時には酸素サイトの電子

分布が変わりますが、アルミサイトの電子分布は変わらないことを明らかにしており、このことは、化学変化を伴わないメモリ動作である酸素空孔モデルを支持するものとなっています。

通常の半導体は、不純物を加えることにより電気特性を変えます（元素ドーピング）。これに対してアモルファスアルミ酸化物は、元素ドーピングすることなく、酸素空孔に外部電子を注入・抽出するだけで電気特性を変えることができる半導体（ドーピングレス半導体）です。通常の半導体とは異なり、ドーピングレス半導体では、薄膜作製後でも外部からの電子の注入・抽出で電気特性を自由に換えられる大きなメリットがあります。

本研究によりアモルファスアルミ酸化物がドーピングレス半導体として不揮発なメモリ動作をすることが明らかになり、この研究成果により、今後、DRAMに代替可能な省電力な不揮発メモリ開発が進展することや、ドーピングレス半導体を活用した新規電子デバイス材料の開発が期待されます。

本研究成果は、2019年9月26日付のアメリカの科学雑誌「AIP advances」のオンライン版に掲載されました（この記事の続きは https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20191114_1500.pdf をご覧ください）。

電子スピンを自在に操ることができる積層材料の開発に成功 - 日常生活の情報化を支える超高記録密度・省エネ磁気メモリの実現に大きく前進 -

2019年12月2日
量子科学技術研究開発機構
高エネルギー加速器研究機構

【概要】

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（理事長 平野俊夫、以下「量研」）量子ビーム科学部門の李松田主任研究員、境誠司プロジェクトリーダーらは、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（機構長 山内正則）物質構造科学研究所の雨宮健太教授、国立研究開発法人物質・材料研究機構（理事長 橋本和仁）の桜庭裕弥グループリーダーらとの共同研究により、電子スピンをを使った情報処理に重要な、電子スピンの向きを揃える性能とスピンの向きを保つ性能のそれぞれに最も優れるホイスラー合金とグラフェンからなる積層材料の開発に成功しました。この新しい材料により電子スピンの自在な操作が可能になることで、超高記録密度で省エネな磁気メモリの実現など、日常生活の情報化を支える情報技術の発展に新たな道が拓かれることが期待できます。

近年、次世代の情報技術としてスピントロニクスが注目を集めています。従来のエレクトロニクスでは、電子のある/なしを情報処理に用いますが、スピントロニクスでは、

さらに電子のスピンの上向き/下向きをデジタル情報として扱うことで、飛躍的に高速で省エネルギーなデバイスを実現できます。スピントロニクスデバイスは、スピンの向きを制御した電流を生み出す磁性体とそのような電流を伝える非磁性体を組み合わせることで、スピンの向きを操作して情報処理を行うため、そのようなデバイスには磁性体と非磁性体を積層した材料が用いられます。今回、研究チームは、スピントロニクスデバイス用の新しい積層材料として、磁性体の中でスピンの向きを揃える性質に最も優れるホイスラー合金と、非磁性体の中でスピンの向きを保つ性質に最も優れるグラフェンからなる材料の開発に世界で初めて成功しました。この新しい積層材料により電子スピンの自在な操作が可能になることで、スピントロニクスによる情報技術の発展に新たな道筋が開かれました。それにより、今後、超高記録密度で省エネな磁気メモリの実現により身の回りの膨大な情報を自在に記録して利用できるようになることや、人間の活動を自然にサポートしてくれるアシスト技術の出現など、情報技術がより便利で生活に密着したものに進歩していくことが期待できます。

本成果は、Advanced Materials 誌のオンライン版に2019年12月3日（火）12:00（現地時間）に掲載されます（この記事の続きは <https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20191202.pdf> をご覧ください）。

航空機用構造材料 (CFRP) の破壊はどこから始まるか—放射光 X 線顕微鏡を用いたナノレベル観察—

2019年12月17日
高エネルギー加速器研究機構

【概要】

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所の木村正雄教授、渡邊稔樹研究員、武市泰男助教、丹羽尉博技師、の研究グループは、航空機の機体や翼の構造材料として用いられている炭素繊維強化樹脂（Carbon fiber reinforced plastic : CFRP）複合材料内に、き裂が発生・進展する様子を放射光 X 線顕微鏡を用いて空間分解能 50 nm 程度で観察することに初めて成功した。

本研究では、CFRP 試料に応力を印加した状態で X 線を照射し X-CT 法により内部の状態を非破壊で三次元観察した。その結果、(A) 樹脂内でのき裂発生と、(B) 炭素繊維 / 樹脂界面での剥離が競合して、き裂が発生するという（起点の特定）、さらにその三次元での進展過程が初めて解明された。

ナノスケールでのき裂の発生・進展挙動は、CFRP のマルチスケール強度設計のための力学モデルの構築に必要とされながら、実験が困難であるため不明であった破壊の初期現象である。それを解明としたことは破壊力学での学術

的意義に加え、航空機産業の材料分野への工学的意義が大きい。

この研究成果は、12月17日10時（日本時間12月17日19時）にNature Publishing Groupの電子ジャーナルScientific Reportsに掲載されます（この記事の続きは<https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20191217.pdf>をご覧ください）。

筋ジストロフィー症に関わる糖鎖を合成する仕組みを解明

2020年1月17日

東京都健康長寿医療センター
高エネルギー加速器研究機構

【概要】

東京都健康長寿医療センターの遠藤玉夫シニアフェロー、萬谷博研究副部長、今江理恵子研究員、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の加藤龍一准教授、桑原直之研究員（研究当時）らの共同研究グループは、先天性筋ジストロフィー症の原因遺伝子FKRPによる糖鎖合成機構を解明し、筋ジストロフィー症の新たな発症メカニズムを明らかにしました。この研究成果は、今後の病態解明や治療法の開発に大きく貢献するものと期待されます。本研究は、Nature Publishing Group発行のオンライン国際科学雑誌「Nature Communications」に1月16日に掲載されました。

今回、X線結晶構造解析によりFKRPの立体構造の解明に成功し、FKRPがリビトールリン酸をつなげて糖鎖を伸ばす仕組みを明らかにしました。FKRPは機能未知だった部分（幹領域）と酵素活性を担う部分（触媒領域）で構成されますが、1分子で単独で存在するのではなく、FKRPが4つ集合した「4量体」という状態で存在し、2つのFKRPのそれぞれの幹領域と触媒領域を使って糖鎖を両端から挟み込むように捕まえることが分かりました。FKRPと糖鎖の結合にはリン酸というこの糖鎖に特徴的な構造が必要でした。さらに、筋ジストロフィー症患者から見つかったいくつかの変異FKRPは、4量体を作ることができず、酵素活性が著しく低下していました。これらの結果から、FKRPが複数で集まって存在することは、FKRPが糖鎖を捕まえるために必須であることが分かりました。同じ酵素2つが協調して糖鎖を捕まえるという方式も、糖鎖を合成する仕組みとして初めての発見であり、ユニークなりビトールリン酸構造を形成する基盤であることが明らかになりました（この記事の続きは<https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/e076ae356eed1708ac9dfcb29c9bba97.pdf>をご覧ください）。

基板に吸着するだけで、100兆個以上の分子の「形状」が一斉に変化 – 世界初、有機半導体の電子状態を物理吸着で制御することに成功 –

2020年1月24日

東京大学

東北大学

筑波大学

産業技術総合研究所

広島大学

高エネルギー加速器研究機構

【概要】

東京大学大学院新領域創成科学研究科、同マテリアルイノベーション研究センター、東北大学大学院理学研究科、大阪大学大学院基礎工学研究科、筑波大学大学院数理物質科学研究科、広島大学大学院理学研究科、スタンフォード大学SLAC国立加速器研究所、産業技術総合研究所産総研・東大先端オペランド計測技術オープンイノベーションラボラトリ、物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（WPI-MANA）の共同研究グループは、有機半導体単結晶超薄膜が基板に吸着する際の分子形状を0.1ナノメートル（100億分の1メートル）の精度で決定することに成功しました。その結果、比較的剛直な構造を持つ有機半導体であるにもかかわらず、基板に物理吸着することで、100兆個以上におよぶ全ての分子が同じように形状を変えることを明らかにしました。この物理吸着に伴う分子形状の変化は、超薄膜の厚さを制御することで抑制され、半導体デバイスの性能指標である移動度が40%以上向上することも明らかにしました。

本研究成果は、英国科学雑誌「Communications Physics」2020年1月23日版に掲載されます。本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金「単結晶有機半導体中電子伝導の巨大応力歪効果とフレキシブルメカノエレクトロニクス」「有機単結晶半導体を用いたスピントランジスタの実現」（研究代表者：竹谷純一）の一環として、一部の実験は高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所フォトンファクトリーBL-3A、SLAC SSRL BL8-2ビームラインを利用して行われました（この記事の続きは<https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20200123.pdf>をご覧ください）。