

グラフェン超伝導材料の原子配列解析

遠藤由大¹, 深谷有喜², 望月出海³, 高山あかり⁴, 兵頭俊夫³, 長谷川修司¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター

³ 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所, ⁴ 早稲田大学理工学術院先進理工学研究科

Structure Analysis of Superconducting Ca-intercalated Bilayer Graphene/SiC by Total-Reflection High-Energy Positron Diffraction (TRHEPD)

Yukihiro ENDO¹, Yuki FUKAYA², Izumi MOCHIZUKI³, Akari TAKAYAMA⁴, Toshio HYODO³, Shuji HASEGAWA¹

¹Department of Physics, The University of Tokyo, ²Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency

³Institute of Materials Structure Science, KEK, ⁴Department of Physics, Waseda University

Abstract

近年、グラフェンの超伝導化に着目した様々な研究が行われており、2層グラフェンにCaを挿入したグラフェン層間化合物において超伝導が報告された。しかし、その詳細な原子配列は明らかではなく、超伝導発現機構に関する議論が明確ではなかった。本研究では、全反射高速陽電子回折 (TRHEPD, トレプト) 法を用いて SiC 基板上 2 層グラフェンに Ca を挿入した試料の構造解析を行い、この化合物の構造は従来考えられていたモデルとは異なり、グラフェンとバッファ層の間にのみ Ca 原子が挿入していることを明らかにした。

1. はじめに

炭素 (C) 原子が蜂の巣のように結合して原子シートを形成するグラフェンは、原子配列が非常に安定していること、高い柔軟性をもつこと、熱伝導や電気伝導などの物理的性質が優れていることなどから、シリコンに代わる新素材として基礎・応用の両面から着目され研究が行われている [1]。これらの物性発現の起源は、グラフェンが持つ特異なディラック電子状態にあると考えられており、この電子状態によって、グラフェンの中を流れる電子はあたかも光と同じように質量がゼロであるかのように振る舞うことができるため、このような電気的特性を利用したデバイスへの応用が期待されている [2]。

最近では、グラフェンのもつ優れた物理的特性と組み合わせた新しい超伝導材料の開発の観点から、グラフェンに超伝導を発現させようとする試みも活発に行われている [3-8]。例えば、グラフェンが幾層にも積み重なったグラファイトにおける超伝導の歴史は古く、50 年以上にわたって研究が行われている。グラファイトの層間に金属原子を挿入したグラファイト層間化合物 (Graphite-Intercalation-Compound, GIC) は、1965 年の KC₈ 以降、多くの化合物が報告されており [9]、2005 年に Weller らによって報告された C₆Ca は、現在、GIC で最も高い超伝導転移温度 $T_c = 11.5$ K を示す物質として知られている [10]。この物質に着想を得て、グラフェンの超伝導化の試みとして GIC の 2 次元極限である「2 層グラフェン層間化合物」の研究が行われ、2016 年には、シリコンカーバイド (SiC) 基板上に作成された 2 層グラフェンにカルシウム (Ca) 原子を挿入した化合物において超伝導が発現することが報告

された [5]。

SiC 上 Ca 挿入 2 層グラフェンにおける超伝導は応用へ大きな可能性を持つ一方で、その正確な原子配列はこれまで議論されてこなかった。第一に、Ca 原子の高い反応性によって大気中では物質が不安定なことから、かつ、わずか数原子層の厚さの物質の精密な構造決定を行う実験手法が確立されていないことが挙げられる。第二に、SiC 基板上にグラフェンが成長する時に SiC 基板とグラフェン層の間に形成されるバッファ層と呼ばれる炭素の層の存在が挙げられる。このバッファ層は、炭素原子のシートという意味ではグラフェンに良く似ているものの、SiC 基板との間に結合をもつことから、グラフェンとは異なる層として扱われる。バッファ層はグラフェンとは全く異なり絶縁体的な電子状態を持つため、バッファ層の存在は超伝導には無関係であると考えられ、SiC 上 2 層グラフェンの場合、炭素原子層が合わせて 3 層積層された構造をとるものの、この上の 2 枚のグラフェンの層間にのみ Ca 原子が挿入された原子配列であると信じられてきた。しかし、物質の性質は物質の原子配列と密接な関係をもつため、研究を進めてなぜ超伝導が発現するかを明らかにするには、まずその結晶構造を正確に知る必要がある。

本研究では、全反射高速陽電子回折 (Total-Reflection High-Energy Positron Diffraction, TRHEPD) 法という試料最表面の原子配列の情報を高感度で検出できる実験手法 [11] を用いて、SiC 上 Ca 挿入 2 層グラフェンの原子配列を明らかにすることを試みた。その結果、これまで信じられてきた原子配列とは異なり、グラフェンとバッファ層の間にのみ Ca 原子が挿入されていることを、実験により初め

て明らかにしたので、その研究結果について本稿で紹介する [12]。

2. 実験条件

2-1. 全反射高速陽電子回折 (TRHEPD, トレプト) 法

3次元結晶の原子配列を調べるには、通常X線が用いられる。X線は物質への侵入長が深く、物質の内部にまで侵入するため、3次元物質の原子配列解析には最適な実験手法である。一方、本研究で取り扱う物質のように、物質の最表面だけに存在する2次元物質の原子配列解析においては、内部の構造からの信号が大きいため、得られた実験結果から表面の寄与だけを抜き出すことが非常に困難である。そのため、2次元物質の構造解析には、これまで電子をプローブとして用いた実験が多く行われてきた。電子はX線と比べてあまり内部に侵入しないため、X線を用いるよりも多くの表面情報を抜き出すことができるという利点がある。しかし、表面から数原子層の領域では、その原子配列は表面再構成や格子緩和のために3次元結晶と比べても非常に複雑であり、表面から4-5層程度の領域で散乱された波の干渉で得られる情報の中から構造を決定することは同様に難しい。

本研究グループで用いたTRHEPD法は陽電子をプローブとして用いた実験手法である。陽電子は、電子の反粒子で、電子とは逆の正の電荷をもつために、すべての物質の表面から斥力を感じるという特徴があり、この性質のため、陽電子を表面すれすれの角度(0~2°程度)から入射させると、物質内部に陽電子が全く入らない全反射という現象が起こり、このことが表面構造解析の大きな利点となっている。さらに、入射する角度(視射角)を全反射の臨界角を越えて徐々に大きくしていくと、陽電子も徐々に物質内に侵入するため、物質の最表面から数原子層の深さの領域内のみからの散乱波の干渉による原子配列が可能であ

る [11]。現在、実用的にTRHEPD実験を行うことができる装置を保有しているのはKEK物構研が世界で唯一であり、その共同利用によりTRHEPD法は日本が世界をリードする実験手法となっている。

どの回折手法でも、試料の対称性は回折パターンに対称性や特定のスポットの有無から判定できるが、原子配列の詳細はスポットの強度を解析しなければ得られない。TRHEPD法によって得られた回折パターンのうち、本研究では、(00)スポット(鏡面反射点)強度の視射角依存性(ロッキング曲線)の実験値と構造モデルから計算された値を比較することで構造解析を行った。ロッキング曲線の計算には、一宮により開発されたマルチスライス法を用いている [13]。実験から得られたロッキング曲線は、*R*因子(reliability factor)により理論曲線と比較・評価され、*R*因子の値が小さいほど、実験値と計算値に近いことを示している。

2-2. 試料作製方法

本研究で用いた2層グラフェンは熱脱離法によって作製した。SiC(0001)(Si面)基板を超高真空中で約1500°Cまで加熱し、Si原子の熱脱離させることで2層グラフェンを得た。グラフェンの層数は角度分解光電子分光により確認している。作製したグラフェンを物構研の低速陽電子実験施設(SPF)内のTRHEPD測定装置に導入し、超高真空中で約500°Cで脱ガスを行った。試料の清浄表面の確認は、装置に設置されている反射高速電子線回折(RHEED)を用いて行った。Fig. 1(a)にSiC上2層グラフェン(Pristine)のRHEED像を示す。グラフェンに由来した1×1ストリーク、SiC基板に由来した1×1スポット、バッファー層に由来する $6\sqrt{3}\times 6\sqrt{3}$ -R30°スポットがそれぞれ観測されている。

本研究では、グラフェンへのCa原子挿入の前段階として、先にLi原子を挿入する操作を行っている [14]。この方法はバルクC₆Caの試料作成方法 [15]を参考にしてお

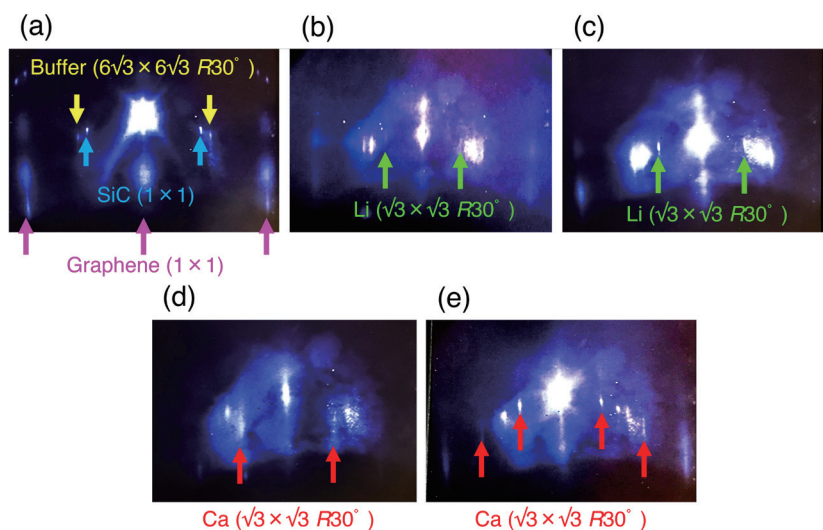


Figure 1 RHEED patterns of (a) pristine bilayer graphene/SiC(0001), Li-intercalated graphene (b) before annealing and (c) after annealing, Ca-intercalated graphene after intercalation process [(i)-(iv)] for (d) 1 cycle and (e) several cycles, respectively.

り、原子半径の大きいCaをより効率的に層間に挿入するために、原子半径の小さいLiを先に挿入してグラフェン層間距離を拡げた後、加熱蒸着によりLiとCaの置換をするという手順でCaを挿入する。Liディスペンサー(SAES Getters社)およびCa蒸着源(自作K-cell)は、TRHEPD測定装置に設置し、真空中で脱ガスを行った後使用した。詳細な試料作成手順は以下の通りである(一連のプロセスにおけるRHEED像をFig. 1(b)-(e)に示す)。

- (i) 室温でLi原子をグラフェンに蒸着すると、Liが層間に挿入され $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°スポットが出現する。この周期構造はバルク C_6Li のLi原子の周期構造に対応する(Fig. 1(b))。
- (ii) (i)の試料を約180°Cまで加熱することにより最表面に吸着した余分なクラスター状のLi原子を脱離させる。この加熱により試料のRHEEDパターンはより明瞭になる(Fig. 1(c))。
- (iii) Li挿入グラフェンを200-270°Cまで加熱しながらCa原子を蒸着すると、Ca原子が新たに形成した $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°周期構造によるストリークおよびスポットとCaクラスター由来のスポットが出現する。この加熱温度は挿入したLi原子が脱離する温度よりわずかに低い値である。
- (iv) (iii)からさらに試料を280-290°Cにポストアニールすると、Caクラスター由来のスポットは消失する。このポストアニールの温度は挿入したLi原子が脱離する温度よりわずかに高い(Fig. 1(d))。
- (v) (i)-(iv)を複数回繰り返すと、次第にCa原子による $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°スポットの強度が強くなる(Fig. 1(e))。

LiおよびCa原子の挿入後もRHEED像の第0ラウエゾーンにバッファ層に由来する $6\sqrt{3}\times6\sqrt{3}$ -R30°スポットが存在することから、Li原子およびCa原子はバッファ層とSiC基板の層間には挿入されておらず、SiC基板とバッファ層の間の結合は保たれていることが分かる。一方で、Li原子は室温での真空蒸着によってSiC基板とバッファ層の間に侵入し、結合を断ち切るという報告があり[16, 17]、本試料においてもLi原子によってこの結合が部分的に切断されている可能性はある。

2-3. 測定条件

本研究では、Fig. 2に示すように、2つの異なる方位角方向、ここでは、 $[1\bar{1}00]$ 方向のビーム(多波(Many-Beam)条件)と $[1\bar{1}00] + 7.5^\circ$ 方向(一波(One-Beam)条件)から入射した陽電子ビームの反射強度を用いて構造解析を行った。One-Beam条件では、意図的に対称性の悪い方向からビームを入射することで、面内周期構造による干渉を打ち消し、面直方向の周期性のみ選択的に調べることができる。それに対して、Many-Beam条件は対称性の良い方向からビームを入射する測定条件であり、ビーム方向に対して垂直な方向の面内周期構造と面直方向の構造の両方に依存した回折強度を得ることが出来る。また、グラフェンのように特定の積層構造を持つ物質においては、多波条件の

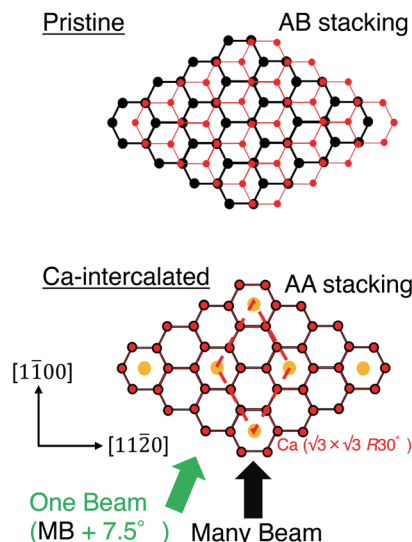


Figure 2 Simple schematic view of bilayer graphene and Ca-intercalated bilayer graphene neglecting the buffer layer and SiC substrate. Shown here is the expected Ca-intercalation change in the stacking structure from AB to AA type, in analogy with that from AB (graphite) to AA (bulk C_6Ca) stacking. Beam directions of the one-beam (many-beam) condition along 7.5° off the $[1\bar{1}00]$ direction (along the $[1\bar{1}00]$ direction) are depicted by the green (black) arrows, respectively.

ビーム入射方位を上手に選択することで、より積層構造の変化に敏感な測定を行うことができる。これらのビーム特性を利用して、初めにOne-Beam条件のロッキング曲線を解析することで面直方向の原子配列(層間距離)を決定し、得られた層間距離を反映させた構造モデルをもとにMany-Beam条件の解析を行うことで、面内の原子配列、すなわち、全体の原子構造を決定した。

3. 実験結果

3-1.2 層グラフェン/SiC(0001)の構造決定

Fig. 3(a), (b)に、Ca挿入前のPristine試料における一波条件(OB)および多波条件(MB)でのロッキング曲線を示す。バッファ層は 0.4 \AA 以下のバックリング構造を持つとされている[18-20]が、表面から深い位置に存在しTRHEPDのロッキング曲線への影響は少ないため、本研究ではこのバックリングを無視して構造解析を行った。ここではSiC上3層グラフェンのモデルを仮定し、層間距離および各グラフェン層のoccupation(占有率)をフィッティングパラメーターとして構造解析を行った結果、Fig. 3(c)に示す構造モデルから得られた計算曲線が実験結果を最もよく再現した。バッファ層-1層目グラフェン、1層目-2層目グラフェン、2層目-3層目グラフェンの層間距離はそれぞれ $3.18 \pm 0.14 \text{ \AA}$ 、 $3.38 \pm 0.06 \text{ \AA}$ 、 $3.66 \pm 0.63 \text{ \AA}$ と得られた。この結果は、先行研究の光電子回折[20]およびX線回折[21]で報告されている値(バッファ層-グラフェン間の層間距離： $3.24 \pm 0.20 \text{ \AA}$ 、 $3.40 \pm 0.10 \text{ \AA}$ 、グラフェン間の層間距離： $3.48 \pm 0.10 \text{ \AA}$ 、 $3.40 \pm 0.05 \text{ \AA}$)と誤差の

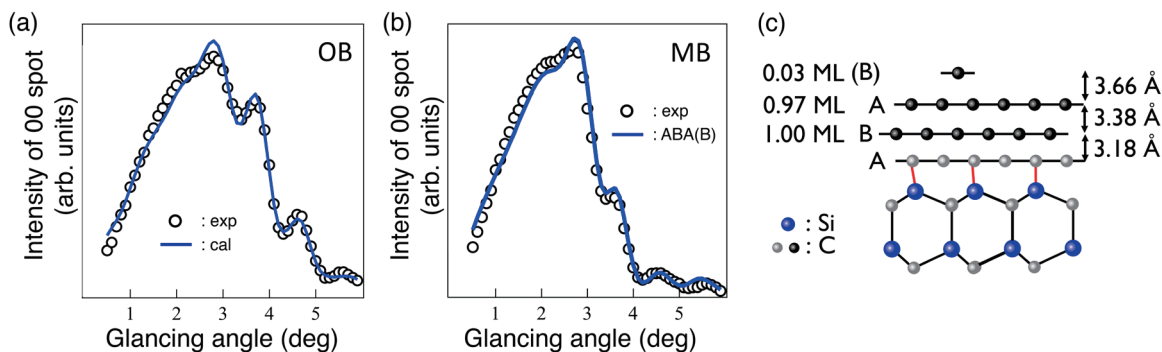


Figure 3 TRHEPD rocking curves under (a) the one-beam condition and (b) many-beam condition with calculated curves for pristine bilayer graphene/SiC(0001). (c) Schematic views of the structural analysis results for pristine bilayer graphene/SiC(0001).

範囲程度で一致している。occupation は、1 層目、2 層目、3 層目グラフェンでそれぞれ 1.00 ML, 0.97 ML, 0.03 ML と求められ、角度分解光電子分光との結果とも良く対応していることがわかる。また、積層構造は多波条件 (MB) から、バッファ層から表面に向かって、ABA(B) 積層モデルの計算曲線と実験値がよく一致していることがわかる (ここでは、occupation の少ない 3 層目グラフェンを (B) 層としている)。SiC 上に成長するグラフェンは、Bernal 積層 (AB 積層) が安定構造であることが知られており [22]、本結果はそれと矛盾しない。この構造モデルにおける R 因子は 0.93% である。これまで、SiC 上 2 層グラフェンにおいて決定版と言える構造モデルはなく、本研究は、バッファ層

層間距離まで含めた SiC 上 2 層グラフェンの精密な構造決定という点でも重要な成果を得た。

3-2. Ca 挿入 2 層グラフェン / SiC(0001) の構造決定

Fig. 4(a), (b) に、Ca 挿入後の試料における一波条件および多波条件での rocking 曲線を示す。ここでは、上記の結果を受けて、グラフェンの層数を 2 層 (バッファ層を含めると 3 層) として解析を行った。この場合、Ca 原子が挿入される可能性がある位置を考えると、Fig. 4(a) に示す 3 種類が検討すべき構造の候補となる。ここで、model 1 は、これまで信じられてきた構造モデルである。本研究の構造解析の結果、Fig. 4(c) に示す構造が最も実験結果を

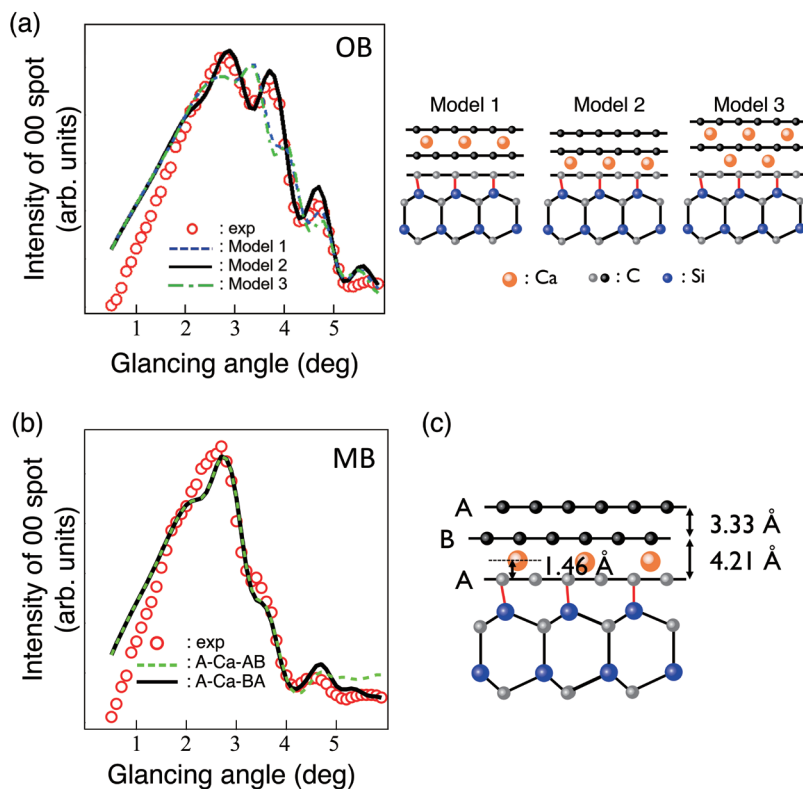


Figure 4 TRHEPD rocking curves under (a) the one-beam condition and (b) many-beam condition with calculated curves for Ca-intercalated bilayer graphene/SiC(0001). Schematic views of (a) the structure models for the analysis under the one-beam condition and (c) the structural analysis results for Ca-intercalated bilayer graphene/SiC(0001).

よく再現し、このことから model 2, すなわち Ca 原子がバッファ層と1層目のグラフェンの間のみ挿入される構造が最も確からしいことがわかった (Ca 挿入グラフェンでは、後述する表面粗さの影響のため、視射角 2° 以上の領域で R 因子を計算・評価している)。一波条件のデータの解析から、層間距離はそれぞれ、バッファ層-グラフェン間およびグラフェン-グラフェン間で $4.21 \pm 0.11 \text{ \AA}$, $3.33 \pm 0.16 \text{ \AA}$ と得られた。また、Ca 原子の場所はバッファ層より $1.46 \pm 2.24 \text{ \AA}$ 高い位置に存在することが解析によって導かれた。グラフェン-グラフェン層間距離は pristine グラフェンの層間距離と誤差の範囲で同じであること、また、Ca 原子が挿入されたバッファ層-グラフェン層間の距離 ($4.21 \pm 0.11 \text{ \AA}$) はバルク C_6Ca の層間距離 (4.5 \AA) [23] と近い値であることがわかる。

次に、Pristine 試料同様、Ca 挿入後の積層構造を多波条件のデータを解析して調べた結果、バッファ層から表面に向かって、A-Ca-BA 積層構造または A-Ca-AB 積層構造が実験値と近い値を取ることがわかった (Fig. 4(b), (c))。上の2層には Ca が挿入していないため、通常の2層グラフェンとみなせることから、Pristine 試料と同様に AB 積層構造をとることは理にかなっている。一方、バッファ層-グラフェン層間の積層構造に関して、A-Ca-BA 積層構造と A-Ca-AB 積層構造の R 因子はそれぞれ $R = 1.70 \%$, $R = 2.07 \%$ であった。 R 因子およびロッキング曲線の比較から議論する場合、A-Ca-BA 積層構造がもっとも確からしいと言えるが、バルク C_6Ca では Ca は AA 積層構造の間に挿入された構造をもつことから [24]、現時点では A-Ca-AB 積層構造の可能性は排除できない。この点を明確にするためには、第一原理計算を用いて構造の安定性を計算するなど、異なる手法からのアプローチと組み合わせることで最終的に構造を決定したいと考えている。

また、光電子顕微鏡による実験において、Li 原子の挿入によってグラフェン表面の粗さが増加する (ripple や clack 構造が生じる) ことが報告されている [17]。つまり、Li 原子の挿入/脱離で生じた表面のダメージによって周期構造を反映しない散乱 (非弾性散乱含む) が増加するため、この最表面の構造を反映した全反射領域の (00) スポット強度は減少すると予想される。事実、Ca 挿入後のロッキング曲線では全反射領域 (視射角 $\sim 2^\circ$ 以下) において実験の強度がいずれの計算曲線よりも低くなっている。このことから TRHPED は表面構造や薄膜の品質や粗さ評価にも有用な手法であるとも言える。

最後に、この試料における超伝導特性を紹介する。2-2節で述べた方法と同じ手順で作製した試料について、その場極低温四端子電気伝導測定装置 [25] を用いて電気抵抗の温度依存性を測定した結果、Fig. 5 に示すように、4 K で抵抗値が低下し始め 2.2 K でゼロ抵抗に達するという、Ichinokura らの報告 [5] とほぼ等しい超伝導転移を観測した [12]。このことから、先行研究においても、本研究で示した原子構造を持つ可能性が高い。また、本研究で決定した構造から2層グラフェン層間化合物の超伝導を議論する

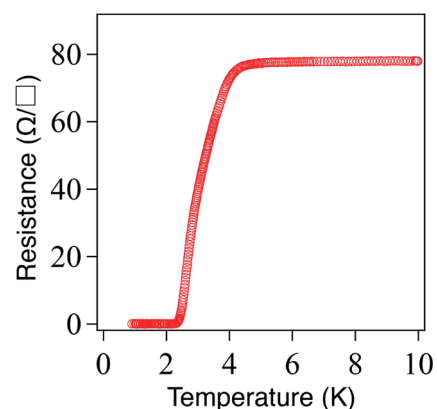


Figure 5 Temperature dependence of sheet resistance in Ca-intercalated graphene/SiC(0001). The resistance dropped steeply at 4 K and reached zero at 2.2 K.

ならば、最表面のグラフェンは超伝導に関与しない可能性が高いと考えられる。すなわち、SiC 基板上の1層グラフェンにおいても超伝導が発現する可能性があり、この検証が今後の課題である。

本研究は PF 共同利用実験の一環として行われました (課題番号: 2016G607, 2017G519)。

引用文献

- [1] K. S. Novoselov and A. K. Geim, *Nat. Mater* **6**, 183 (2007).
- [2] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos and A. A. Firsov, *nature* **438**, 197 (2005).
- [3] B. M. Ludbrook, G. Levy, P. Nigge, M. Zonno, M. Schneider, D. J. Dvorak, C. N. Veenstra, S. Zhdanovich, D. Wong, P. Dosanjh, C. Straßer, A. Stöhr, S. Forti, C. R. Ast, U. Starke, and A. Damascelli, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**, 11795 (2015).
- [4] A. P. Tiwari, S. Shin, E. Hwang, S.-G. Jung, T. Park and H. Lee, *Journal of Physics: Condensed Matter* **29**, 445701 (2017).
- [5] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi and S. Hasegawa, *ACS Nano* **10**, 2761 (2016).
- [6] M. Xue, G. Chen, H. Yang, Y. Zhu, D. Wang, J. He and T. Cao, *Journal of the American Chemical Society* **134**, 6536 (2012).
- [7] Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras and P. Jarillo-Herrero, *Nature* **556**, 43 (2018).
- [8] H. B. Heersche, P. Jarillo-Herrero, J. B. Oostinga, L. M. Vandersypen and A. F. Morpurgo, *Nature* **446**, 56 (2007).
- [9] M. Dresselhaus and G. Dresselhaus, *Advances in Physics* **30**, 139 (1981).
- [10] T. E. Weller, M. Ellerby, S. S. Saxena, R. P. Smith and N. T. Skipper, *Nature Physics* **1**, 39 (2005).
- [11] Y. Fukaya, A. Kawasuso, A. Ichimiya and T. Hyodo, *Journal of Physics D: Applied Physics* **52**, 013002 (2018).

- [12] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo and S. Hasegawa, *Carbon* **157**, 857 (2020).
- [13] A. Ichimiya, *Japanese Journal of Applied Physics* **22**, 176 (1983).
- [14] K. Kanetani, K. Sugawara, T. Sato, R. Shimizu, K. Iwaya, T. Hitosugi and T. Takahashi, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **109**, 19610-19613 (2012).
- [15] K. Sugawara, T. Sato and T. Takahashi, *Nature Physics* **5**, 40 (2009).
- [16] N. M. Caffrey, L. I. Johansson, C. Xia, R. Armiento, I. A. Abrikosov and C. Jacobi, *Physical Review B* **93**, 195421 (2016).
- [17] C. Virojanadara, A. Zakharov, S. Watcharinyanon, R. Yakimova and L. I. Johansson, *New Journal of Physics* **12**, 125015 (2010).
- [18] L. De Lima, A. De Siervo, R. Landers, G. Viana, A. Goncalves, R. Lacerda and P. Häberle, *Physical Review B* **87**, 081403 (2013).
- [19] M. Conrad, J. Rault, Y. Utsumi, Y. Garreau, A. Vlad, A. Coati, J.-P. Rueff, P. Miceli and E. Conrad, *Physical Review B* **96**, 195304 (2017).
- [20] I. Razado-Colambo, J. Avila, D. Vignaud, S. Godey, X. Wallart, D. Woodruff and M. Asensio, *Scientific reports* **8**, 10190 (2018).
- [21] A. Ruammitree, H. Nakahara, K. Akimoto, K. Soda and Y. Saito, *Applied Surface Science* **282**, 297 (2013).
- [22] E. Mostaani, N. D. Drummond and V. I. Fal'Ko, *Physical review letters* **115**, 115501 (2015).
- [23] N. Emery, C. Hérold, J.-F. Maréché and P. Lagrange, *Science and Technology of Advanced Materials* **9**, 044102 (2009).
- [24] N. Emery, C. Hérold, M. d'Astuto, V. Garcia, C. Bellin, J. Maréché, P. Lagrange and G. Louprias, *Physical review letters* **95**, 087003 (2005).
- [25] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, H. Mizuno, Y. Miyatake and T. Nagamura, *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **10**, 400 (2012).

(原稿受付日：2020年6月8日)

著者紹介

遠藤由大 Yukihiro ENDO



日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所 研究員

〒243-0198

神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

TEL: 046-240-3346

e-mail: yukihiro.endo.cd@hco.ntt.co.jp

略歴：2020年東京大学大学院理学系研究

科博士課程終了。2020年NTT物性科学基礎研究所研究員。理学博士。

最近の研究：グラフェン層間化合物の超伝導とその構造の解明

趣味：工作。全自動植物育成装置を開発中。

高山あかり Akari TAKAYAMA



早稲田大学理工学術院先進理工学研究科物理及応用物理学専攻 准教授

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

TEL: 03-5286-2981

FAX: 03-5286-2981

e-mail: a.takayama@waseda.jp

略歴：2013年東北大学理学研究科博士

課程終了，2018年より現所属（専任講師），2020年より現職。理学博士。

最近の研究：2次元原子層薄膜の物性・構造研究