

原子膜トランジスタに新たな機能

—電圧印加で超伝導に—

1. 発表者：

叶 劍挺（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻・量子相エレクトロニクス研究センター 特任講師）

張 奕勁（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 修士課程2年）

明石 遼介（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 博士課程2年）

M. S. Bahramy（理化学研究所 基幹研究所 強相関量子科学研究グループ 強相関理論研究チーム 特別研究員）

有田 亮太郎（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻・量子相エレクトロニクス研究センター 准教授／理化学研究所 基幹研究所 強相関量子科学研究グループ 強相関理論研究チーム 客員研究員）

岩佐 義宏（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻・量子相エレクトロニクス研究センター 教授／理化学研究所 基幹研究所 強相関量子科学研究グループ 強相関複合材料研究チーム チームリーダー）

2. ポイント：

- ◆ポストグラフェン材料としての二硫化モリブデンを用いたトランジスタ
- ◆二硫化モリブデンが、電圧印加によって超伝導に
- ◆化学合成では到達できない電荷密度領域をトランジスタによって実現

3. 概要：

国立大学法人 東京大学【総長 濱田 純一】大学院 工学系研究科 量子相エレクトロニクス研究センターの叶劍挺 特任講師、岩佐義宏 教授（独立行政法人 理化学研究所【理事長 野依良治】基幹研究所 強相関複合材料研究チーム チームリーダー兼任）率いる研究グループは同研究科物理工学専攻 有田亮太郎 准教授らと共同で、グラフェンに続く新たな原子膜材料¹として注目される二硫化モリブデンの電界効果トランジスタ（FET）²を作製し、これが優れたトランジスタ特性を示すと同時に、電圧印加によって超伝導を発現させ、それを制御することに成功した。

低消費電力化を目指したトランジスタ材料の研究は、酸化物や有機物を中心に進められているが、原子層厚みのグラフェンも有力な材料として検討されている。しかしグラフェンはバンドギャップが小さく、スイッチング特性に限界があるため、十分な大きさのバンドギャップを持つ材料の開発が求められている。研究グループは、古くから潤滑剤として非常によく知られる二硫化モリブデン（MoS₂）を対象に選び FET の作成・評価を行い、ゲート絶縁体に電気二重層を使用したトランジスタを作製した。その結果、電圧の印加によって、MoS₂が 10K 以

下で超伝導になることが確認され、その転移温度を電圧によって連続的に変化させることに成功した。本研究は、超伝導の強力な制御法を提供するとともに、 MoS_2 をはじめとする一群の物質がグラフェンに続く有力な原子膜物質となることを明らかにした。

本研究成果は米国科学雑誌『*Science*』（11月30日号）に掲載された。

4. 発表内容：

① 背景

電界効果トランジスタ（FET）はコンピューターを構成する素子の最小単位である。近年、基礎研究レベルでは、シリコン以外の材料、特に酸化物材料、有機材料、炭素材料などを対象に、新たな機能を目指した研究が盛んに行われている。とりわけ注目を集めているのが、グラフェンなどの原子膜物質である。グラフェンは、2010年のノーベル物理学賞の対象となったように、その特異な物性をデバイスに応用する努力が盛んに行われている。実際、FETの材料としての研究も行われているが、バンドギャップがゼロないしは非常に小さいために演算素子としてのFETに応用するのは至極困難である。代わりに注目を集めているのが同様の層状構造を有する半導体である。これらの物質は有限のバンドギャップを持つためにスイッチング素子として、大きなON/OFF比を実現でき、よりFETに適している。特に二硫化モリブデン（ MoS_2 ）は固体潤滑剤として古くから知られており、エンジンオイルの添加剤としても使われる程身近な物質で、これまでに原子膜 MoS_2 を用いた高性能FETや、柔軟性を持ったFETが実現されている。

一方、FETの性能を向上させる一つの指針はより多くの電荷密度を誘起することである。近年、電気二重層（EDL）³をゲート絶縁体に用いることで、従来の固体絶縁体使用時に比べて一桁以上大きい電荷密度を実現できることが報告されている。EDLをもちいたFETは、その定電圧動作だけでなく、電圧印加による物質の量子状態の制御をも可能にした。EDLを用いたFETは現在様々な分野から注目を集めるデバイスである。

② 研究内容（具体的な手法など詳細）

MoS_2 のEDL-FETは、スコッチテープを用いてグラフェンFETと同様な方法によって作製された。今回は、ゲート電極を2つ有する2重ゲートトランジスタを作製した（図1）。電圧印加による抵抗の変化の様子を図2に示す。これは抵抗の温度依存性を測定したもので、ゲート電圧なしでは MoS_2 は、電気抵抗が高く、温度の低下とともに抵抗値が増加する絶縁的な振る舞いを示している。ゲート電圧の上昇に伴って抵抗値が下がり金属的となり、最後に超伝導体へと変化した。このように電圧によってさまざまな物質を超伝導化する研究は、2008年の本グループの発見以降、多くの例が報告されているが、本研究で特筆すべきことは、精密な電子相図を描くことに成功したことである。ゲート電圧を変化させると MoS_2 に蓄積された電子数が変化するが、その電子数に対し超伝導転移温度がどのように変化するかをまとめたものが図3である。注目すべき点として、超伝導転移温度は、ある電子数から突然出現し、すぐに最高値をとり減少し始めることがあげられる。このように、EDLゲートによってこの物質の未踏の領域に到達することが可能となったのである。

③ 今後の展望

本研究により、最近ポストグラフェンとして注目を集めている原子層物質、二硫化モリブデン MoS_2 が、FET の材料としてすぐれているだけでなく、FET の構造のまま超伝導を発現するという、特異な性質を持つことが明らかになった。二硫化モリブデンのような一群の層状物質には、グラフェンとは異なる新たな機能が隠されていることが明らかになったわけである。今後、これら一群の物質の原子膜デバイスが、大きく発展することが期待される。

本研究成果の一部は、内閣府総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラム (FIRST) の「強相関量子科学」事業 (中心研究者：十倉 好紀 東京大学大学院工学系研究科教授) によるもので、日本学術振興会を通じて助成され実施されました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Science」

論文タイトル：Superconducting Dome in a Gate Tuned Band Insulator

著者：J. T. Ye, Y. J. Zhang, R. Akashi, M. S. Bahramy, R. Arita, and Y. Iwasa

DOI 番号：10.1126/science.1228006

アブストラクト URL：<http://www.sciencemag.org/content/338/6111/1193.abstract>

6. 問い合わせ先：

国立大学法人東京大学大学院工学系研究科量子相エレクトロニクス研究センター

特任講師 叶 剣挺 (イエ ジャンティン)

教授 岩佐 義宏 (いわさ よしひろ)

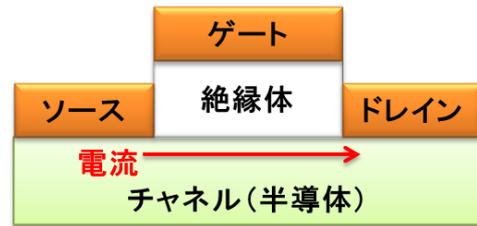
7. 用語解説：

* 1 原子膜材料

2010 年のノーベル物理学賞で注目されているグラフェンを代表とする、原子層 1 枚あるいは数枚で形成される材料。これらは、グラファイトと同様、層状の物質から形成することが可能である。その手法としては、ノーベル賞の対象となったスコッチテープを用いた劈開法や、化学気相成長法 (CVD) などがある。二硫化モリブデンは、遷移金属カルコゲナイドと呼ばれる物質の一つで、グラファイトと同様に強い劈開性を持っているため、古くから固体潤滑剤として用いられている。最近、二硫化モリブデンは、ポストグラフェン物質として注目を集めるようになった。

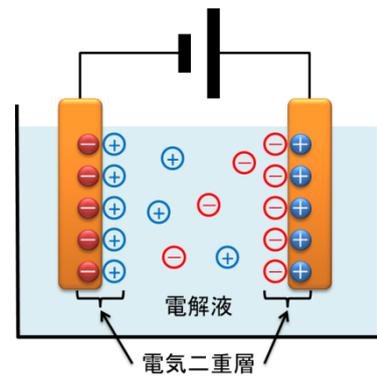
* 2 電界効果トランジスタ (FET)

電圧を印加することで固体表面に電荷を集めることを電界効果ドーピングという。典型的な例としてコンデンサーが挙げられる。電荷量が変わると電流の流れやすさも変化するが、コンデンサーの電極の片方を半導体に置き換えると、その変化量が格段に大きくなる。この原理を応用して電氣的に電流を ON / OFF するスイッチング素子のことを電界効果トランジスタ（右図）と呼ぶ。本研究では半導体材料として二硫化モリブデンを用いた。また、コンデンサーの電極間に挿入する絶縁体として電気二重層を使用し、より小さな電圧でより多くの電荷量を実現した。



* 3 電気二重層

液体の塩（えん）あるいは塩を溶かした液体の中に二つの固体電極を入れ、電極間に電圧を印加した時に液体と固体の界面にできる帯電層のこと。塩を構成している陽イオン（正の電荷を持つ）と陰イオン（負の電荷を持つ）はそれぞれ負と正の電圧が印加されている電極に引き寄せられ、最終的に電極界面に整列する。この時電極内では、イオンとは反対の符号を持つ電荷が界面に引き寄せられている。液体中のイオン層と電極内の電荷層をまとめて電気二重層と呼ぶ。



8. 添付資料：

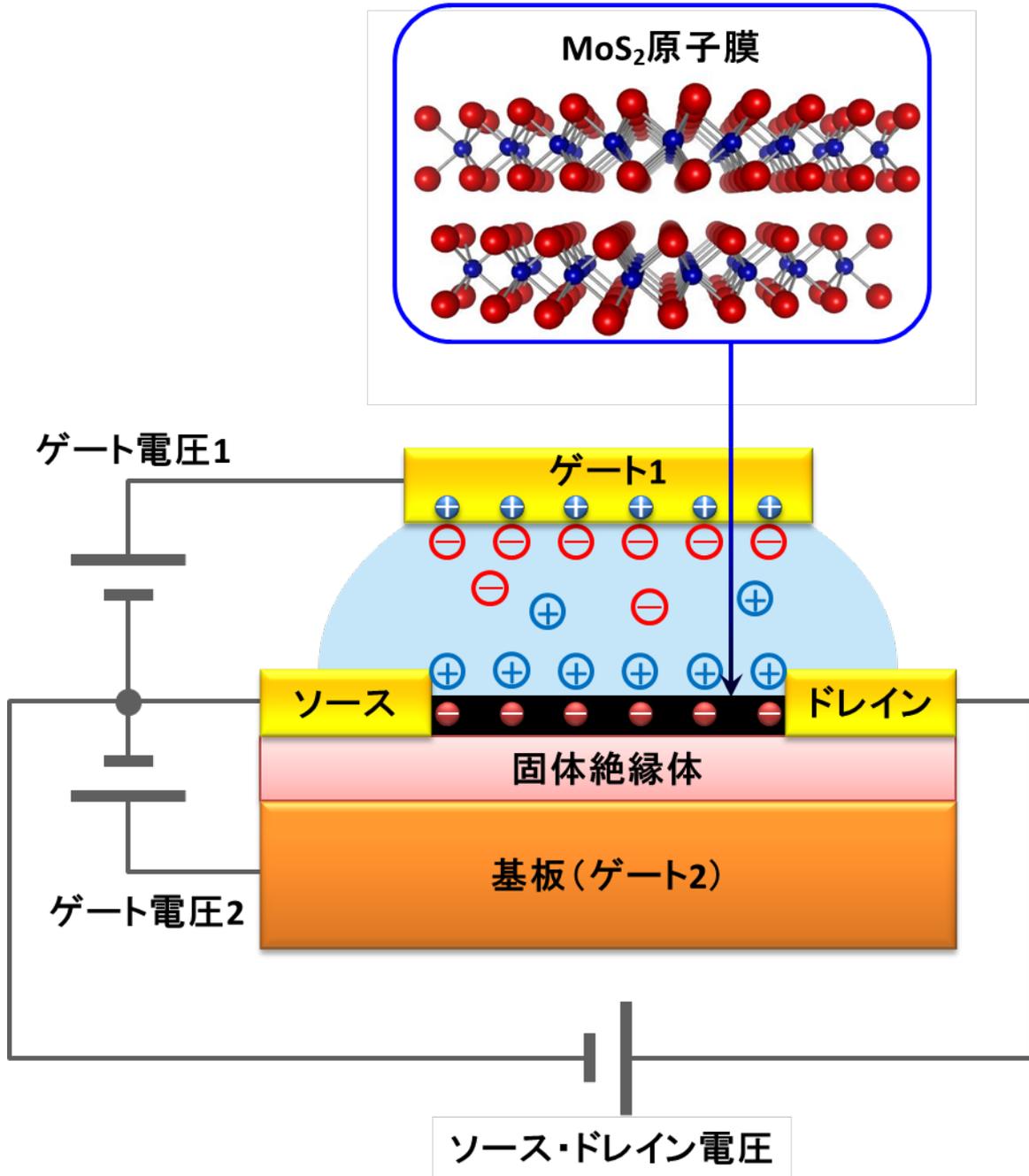


図1：二重ゲートを用いたデバイス構造

今回の研究で用いたトランジスタのデバイス構造。MoS₂原子膜をトランジスタのチャンネルに用いて良好なトランジスタ動作を実現した。さらに、上部の電気二重層を介したゲート電極1と、下部の固体絶縁体を介したゲート電極2によって、超伝導を精密制御することに成功した。

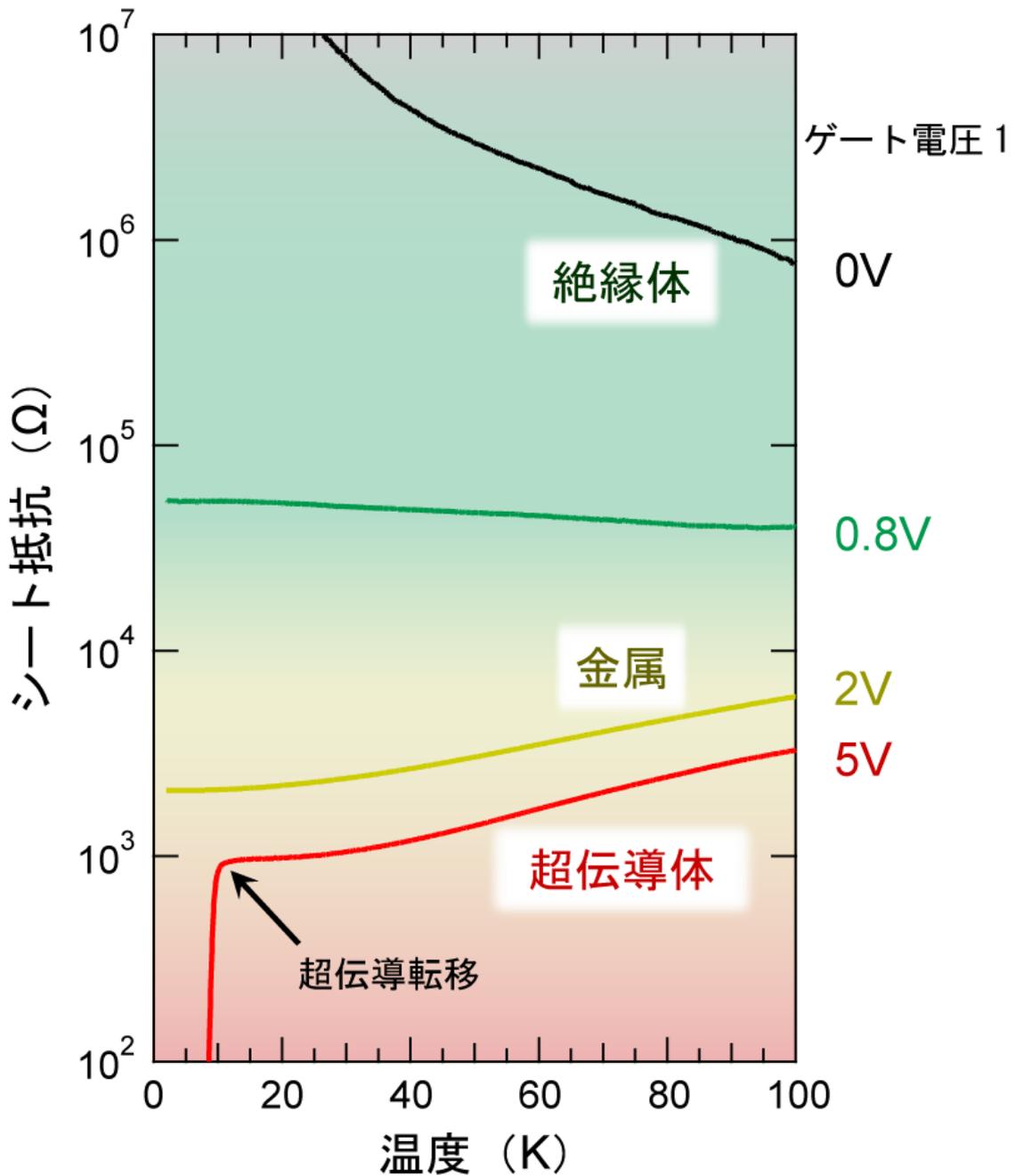


図2：電界効果による二硫化モリブデンの絶縁体-金属-超伝導転移

電圧を印加していない状態では試料本来の絶縁的な温度依存性（黒線）を示すが、電圧を大きくするに従い抵抗値が減少（青線）し、温度低下に伴って抵抗も低下する金属的な振る舞いへと変化（緑線）する。さらに電圧を大きくすると低温領域において抵抗値が“0”になる超伝導転移が観測された。

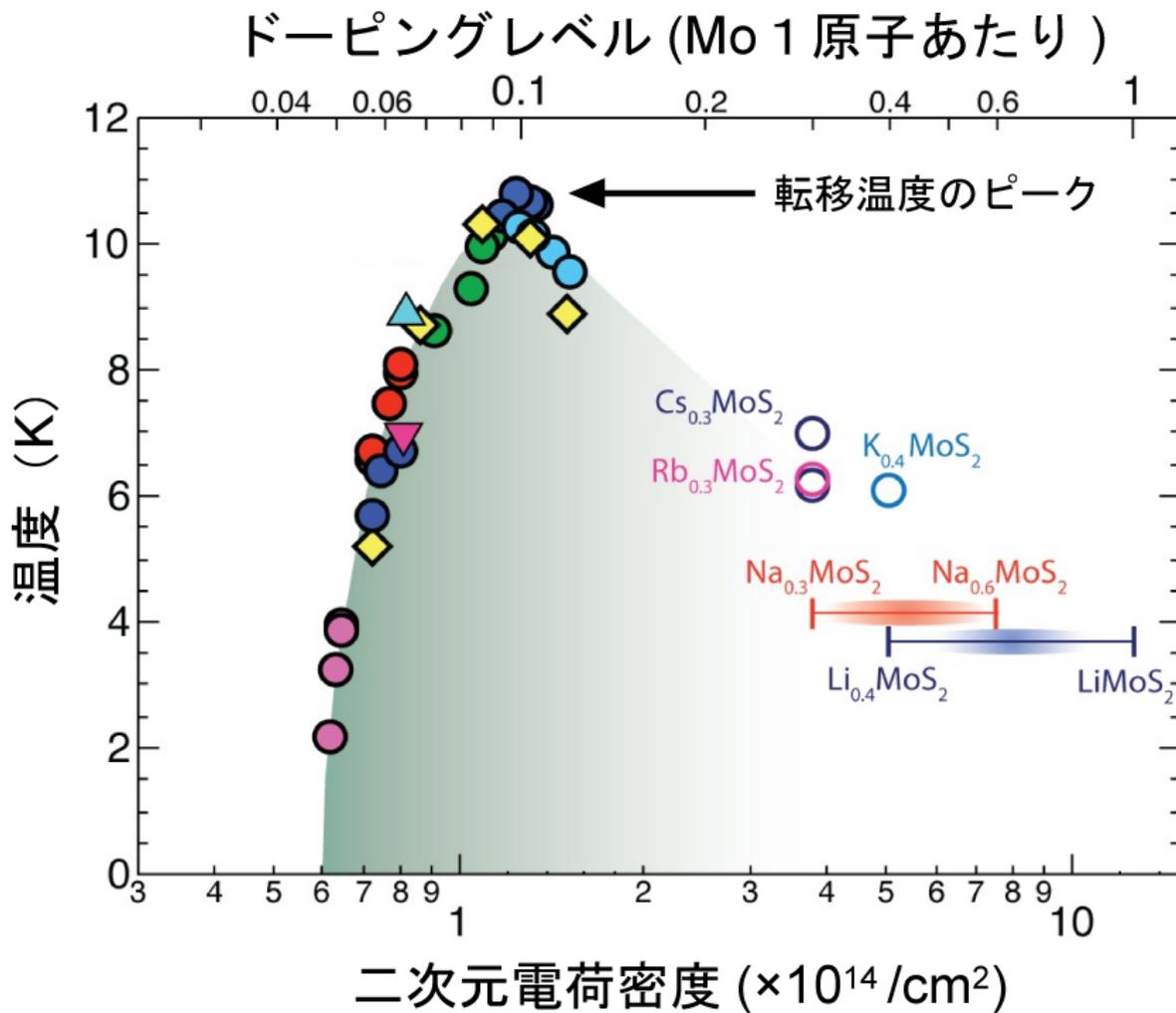


図 3 : 二硫化モリブデン MoS₂ トランジスタにおける超伝導転移温度と電子数の関係

今回の結果 (EDLT doping) から、ゲート電圧を印加して MoS₂ トランジスタにおける電子数を増やしてゆくと、超伝導が急に出現し、その後ある電子数でピークをとることが明らかになった。