

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分

平成28年 5月31日現在

研究課題名（和文） **イオントロニクス学理の構築**

研究課題名（英文） **Emergent Iontronics**

課題番号：25000003

研究代表者

岩佐 義宏 (IWASA YOSHIHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要：イオン伝導体を、半導体・金属などの電子伝導体に接触させた界面には、固体デバイスでは困難な強電界の発生、高電荷蓄積が可能であり、その結果、電界誘起相転移など従来の固体デバイスでは不可能な際立った電子機能が発現する。このような概念をイオントロニクスと呼び、学際領域における新たな物性・機能の学理として確立する。

研究分野：固体物理学

キーワード：イオントロニクス、2次元物質、2次元超伝導、先端機能デバイス、

#### 1. 研究開始当初の背景

(1) 電子伝導体—イオン伝導体界面において、電気化学反応の前段階に形成される電気二重層(EDL)に発生する電界は、固体デバイス中の電界よりも1~2桁程度大きい。これを利用したトランジスタは電気二重層トランジスタ(EDLT)と呼ばれ、電界誘起超伝導、電界誘起強磁性、電界誘起モット転移など、数々の電界誘起相転移現象が明らかになってきた。

(2) ポストグラフェン材料として遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)など、機械剥離法を代表とする様々な方法でいわゆる2次元結晶が作製されるようになった。

#### 2. 研究の目的

EDLTを中心とした物性物理研究と、イオン液体を中心とした材料・化学分野の融合分野として、イオン制御による電子機能学理『イオントロニクス』を創成し、格段に発展させることを目的とする。

#### 3. 研究の方法

(1) 電子相制御：EDLTによる電界効果、および広範囲の電気化学プロセスによる電子相制御技術とそこでの物理概念を確立するとともに、新物質相を創成する。

(2) 物質科学：電子伝導体、イオン伝導体の探索と、各物質における物性、界面構造、電気化学過程の解明を行う。

(3) 機能デバイス：電気化学過程を利用した新機能電子デバイスの基礎研究。

#### 4. これまでの成果

TMDをはじめとする2次元物質(図1)に、EDLTが非常に有効であることをいち早く発見し、2次元物質分野の初期に両極性トランジスタ、フレキシブルトランジスタ、円偏光発光デバイスなどで先駆的な研究を行った。続いて急激に立ち上がりつつある2次元超伝導分野においても、エキゾチックな物性の発見、超伝導転移温度の上昇などを通じて、本研究が先導的役割を果たした。

本研究によってイオントロニクス学理は、その適用範囲が大きく広がり、2次元物質、電気化学界面などの学際分野において、飛躍的な進展を果たしつつある。

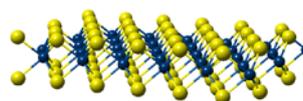


図1 遷移金属ダイカルコゲナイド MoS<sub>2</sub> 単層薄膜の構造

#### (1) 電界誘起超伝導の物理

電圧によって誘起する超伝導をTMDに応用し、KドープMoTe<sub>2</sub>などの新物質を発見するとともに、本研究で初めて、物質固有の2次元超伝導の物理を発展させた。まず、超伝導の上部臨界磁場の磁場方位依存性を詳しく調べ、電界によって誘起される超伝導が2次元超伝導であることを直接証明した。この電界誘起超伝導は、欠陥はおろかグレイン境界もほとんどない単結晶で発現している。その結果、従来の2次元超伝導の研究舞台であった乱れの多い金属超薄膜と異なり、EDLTが2次元超伝導の本質的な物性の研究対象となりうるということがわかった。ZrNClについては磁

束のピンニングが極めて弱いことを反映した量子金属状態を発見した(論文1)。MoS<sub>2</sub>については特異なスピン分極を伴う電子構造に由来した、巨大な超伝導上部臨界磁場を発見した(論文2)。

(2)電気化学エッチングの発見と FeSe 単層高温超伝導

EDLT の電圧と温度を操作することで、電気化学エッチングによる層状物質群の原子層薄膜化が可能であることを発見した。このエッチング法を、FeSe 薄膜に適用することにより、約 20nm 程度(40 層相当、 $T_c = 8$  K)の膜厚から 1nm 程度(単分子層)に近い極薄膜を得ることに成功し、 $T_c$  が 8 K(多層)から 40K(単層)まで上昇してゆく過程を世界で初めて明らかにした(図2 論文3)。

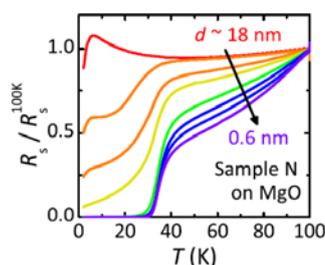


図2 電気化学エッチングによる FeSe 超薄膜の超伝導

(3) バレートロンクスに基づく電圧制御可能な円偏光発光素子

TMD の多くは電子も正孔も伝導する両極性動作を示す。これを用いて、EDLT チャネルに p-n 接合を電界によって作製できることを示した。WSe<sub>2</sub> の単層および多層膜に電界誘起 p-n 接合を形成し、これに順方向の電流を注入することによって発光トランジスタを実現した。驚くべきことに、物質やデバイス構造にキラリティがないにもかかわらず、電界発光が円偏光していることを見出した(図3)。この発光素子の p-n 接合は電界で形成されているため、電圧反転によって簡単に向きを反転できる。そうすると、電圧の印加方向によって、円偏光が右回りから左回りに反転することを明らかにした。このように電圧で円偏光を反転できる発光デバイスは本研究が初めてである。2 つのバレーで異なる円偏光遷移則を有することに由来する、全く新規な光バレートロンクスデバイスであり、その基本原理が、EDLT により発見された(論文4)。

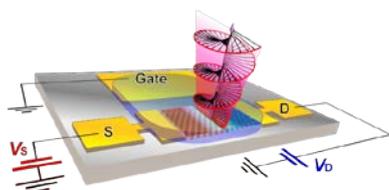


図3 WSe<sub>2</sub> の EDLT をベースにした、円偏光発光素子。電圧による円偏光の制御が可能

5. 今後の計画

(1) イオントロニクスを目指すべき道の一つが、高密度 2 次元電子系の物理であることが明確になったため、今後はこの方面の先鋭化を進めたい。とくに EDLT が作る超強電界がもたらす、空間反転対称性の破れに起因するエキゾチックな物性の探求を行う。

(2) 本研究では複雑な電気化学過程を制御することにより、他の方法では実現が容易でない現象も数々発見され、イオントロニクス技術の強力が明らかになっている。これを新規なイオン液体など、多くの物質に適用し、物性、機能性を拡張してゆくことによって、イオントロニクスの学理を確立する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

・受賞

2014 年 科学技術分野の文部科学大臣表彰

2015 年 本多フロンティア賞

・論文

(1) Y. Saito, Y. Kasahara, J. T. Ye, Y. Iwasa, and T. Nojima, “Metallic ground state in an ion-gated two-dimensional superconductor” *Science* **350**, 409-413 (2015).

(2) Y. Saito, Y. Nakamura, M. S. Bahramy, Y. Kohama, J. T. Ye, Y. Kasahara, Y. Nakagawa, M. Onga, M. Tokunaga, T. Nojima, Y. Yanase, and Y. Iwasa, “Superconductivity protected by spin-valley locking in ion-gated MoS<sub>2</sub>” *Nature Physics* **12**, 144-149 (2016).

(3) J. Shiogai, Y. Ito, T. Mitsuhashi, T. Nojima, and A. Tsukazaki, “Electric-field-induced superconductivity in electrochemically etched ultrathin FeSe films on SrTiO<sub>3</sub> and MgO” *Nature Physics* **12**, 42-46 (2016).

(4) Y. J. Zhang, T. Oka, R. Suzuki, J.T. Ye, and Y. Iwasa, “Electrically switchable light emitting transistor” *Science* **344**, 725-728 (2014).

(5) R. Suzuki, M. Sakano, Y. J. Zhang, R. Akashi, D. Morikawa, A. Harasawa, K. Yaji, K. Kuroda, K. Miyamoto, T. Okuda, K. Ishizaka, R. Arita and Y. Iwasa, “Valley-dependent spin polarization in bulk MoS<sub>2</sub> with broken inversion symmetry” *Nature Nanotechnology*. **9**, 611-617 (2014).

(6) H. T. Yuan, M.S. Bahramy, K. Morimoto, S.F. Wu, K. Nomura, B.-J. Yang, H. Shimotani, R. Suzuki, M.L. Toh, Ch. Kloc, X.D. Xu, R. Arita, N. Nagaosa, and Y. Iwasa, “Zeeman-type spin splitting controlled by an electric field” *Nature Physics* **9**, 563-569 (2013).

(7) 岩佐義宏, 下谷秀和, 【総合報告】融合学理イオントロニクス, 応用物理 **84**, 306-318 (2015).

・ホームページ等

<http://iwasa.t.u-tokyo.ac.jp/>