

先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム) 実績報告書

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	透明半導体スピントロニクス基礎と応用
研究機関・ 部局・職名	東京大学・大学院理学系研究科・准教授
氏名	福村 知昭

1. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年3月31日

2. 収支の状況

(単位:円)

	交付決定額	交付を受けた額	利息等収入 額	収入額合計	執行額	未執行額	既返還額
直接経費	119,000,000	119,000,000	0	119,000,000	118,998,893	1,107	0
間接経費	35,700,000	35,700,000	0	35,700,000	35,700,000	0	0
合計	154,700,000	154,700,000	0	154,700,000	154,698,893	1,107	0

3. 執行額内訳

(単位:円)

費目	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	合計
物品費	0	54,718,462	34,917,338	23,876,479	113,512,279
旅費	23,780	605,460	1,946,257	510,520	3,086,017
謝金・人件費等	0	0	0	0	0
その他	0	512,298	405,742	1,482,557	2,400,597
直接経費計	23,780	55,836,220	37,269,337	25,869,556	118,998,893
間接経費計	0	16,758,000	0	18,942,000	35,700,000
合計	23,780	72,594,220	37,269,337	44,811,556	154,698,893

4. 主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関名
四重極分析計	(株)アールデック	1	945,000	945,000	2011/8/2	東京大学
RHEED画像処理システム	(株)パスカル	1	4,102,875	4,102,875	2011/10/5	東京大学
スパッタガン	(株)パスカル	1	1,653,750	1,653,750	2012/2/29	東京大学
X線回折装置	ブルカー・エイ エックス(株)	1	29,925,000	29,925,000	2012/3/19	東京大学
SPM装置	エスアイアイ・ナ ノテクノロジー	1	14,196,000	14,196,000	2012/3/26	東京大学
ターボV301ポンプ	(株)パスカル	1	708,697	708,697	2012/6/11	東京大学
ICDDPDF-2 2012 アカデ ミック	(株)ライトストー ン	1	840,000	840,000	2013/3/1	東京大学
UHV式スリム回転窓式レーザ ー導入機構	AOV(株)	1	861,000	861,000	2012/10/2	東京大学
コンビナトリアルスパッタガン	(株)パスカル	1	1,653,750	1,653,750	2013/3/18	東京大学
物理特性測定システム装置	米国カンタム・デ ザイン社	1	28,455,000	28,455,000	2013/2/8	東京大学
水平サンプルローテータ P310 ALU	米国カンタム・デ ザイン社	1	3,778,950	3,778,950	2013/7/29	東京大学
コンビナトリアルスパッタガン S PG-002-CONB	(株)パスカル	1	1,653,750	1,653,750	2013/8/14	東京大学
パイロメータ	(株)パスカル	1	721,350	721,350	2013/8/23	東京大学
スタンダードPLD装置 ST-LM BE-THK001	(株)パスカル	1	11,812,500	11,812,500	2014/2/28	東京大学
ターボ分子ポンプ排気システム TS75W3002	アールデック社	1	630,000	630,000	2014/3/18	東京大学

5. 研究成果の概要

半導体スピントロニクスは、電子のもつ電荷とスピン両方を活用する次世代エレクトロニクス技術であるが、この発展には室温強磁性半導体が必要である。透明酸化物半導体の二酸化チタンにコバルトを添加すると室温強磁性が発現する。本研究で、このコバルト添加二酸化チタンに対して約3ボルトの低電圧を印加することで、室温強磁性のオンオフを電氣的にスイッチングすることに成功した。この室温強磁性の電氣的制御は、室温動作半導体スピントロニクスの重要な基盤技術であり、強磁性体の不揮発性を活用した省電力・長寿命デバイスの実現につながる。コバルト添加二酸化チタンの透明性を活用すれば、窓ガラス等に搭載した目に見えないデバイスやコンピュータの実現も可能である。

課題番号	GR029
------	-------

先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム) 研究成果報告書

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名 (下段英語表記)	透明半導体スピントロニクス基礎と応用
	Fundamental and application of transparent semiconductor spintronics
研究機関・部局・ 職名 (下段英語表記)	東京大学・大学院理学系研究科・准教授
	The University of Tokyo, Graduate School of Science, Associate Professor
氏名 (下段英語表記)	福村 知昭
	Tomoteru Fukumura

研究成果の概要

(和文):

半導体スピントロニクスは、電子のもつ電荷とスピン両方を活用する次世代エレクトロニクス技術であるが、この発展には室温強磁性半導体が必要である。透明酸化物半導体の二酸化チタンにコバルトを添加すると室温強磁性が発現する。本研究で、このコバルト添加二酸化チタンに対して約3ボルトの低電圧を印加することで、室温強磁性のオンオフを電氣的にスイッチングすることに成功した。この室温強磁性の電氣的制御は、室温動作半導体スピントロニクスの重要な基盤技術であり、強磁性体の不揮発性を活用した省電力・長寿命デバイスの実現につながる。コバルト添加二酸化チタンの透明性を活用すれば、窓ガラス等に搭載した目に見えないデバイスやコンピューターの実現も可能である。

(英文):

Semiconductor spintronics is one of the promising technologies for next generation electronics by utilizing charge and spin degrees of freedom in electrons. For the development of semiconductor spintronics, room temperature ferromagnetic semiconductor is needed. A transparent oxide semiconductor, titanium dioxide doped with cobalt, is ferromagnetic at room temperature. In this study, electrical induction of the room temperature ferromagnetism in cobalt-doped titanium dioxide was achieved with the application of voltage as low as about three volts. This electrical

control of the room temperature ferromagnetism is a fundamental technique for room temperature semiconductor spintronics devices, paving the way to the realization of low energy consumption and long lifetime devices utilizing non-volatility of the ferromagnetism. The transparency of the cobalt-doped titanium dioxide will also contribute to the realization of invisible devices and computers integrated on window glass, for example.

1. 執行金額 154,698,893 円
(うち、直接経費 118,998,893 円、間接経費 35,700,000 円)

2. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年 3月31日

3. 研究目的

半導体スピントロニクスは、半導体エレクトロニクスの活用する電荷に加えて、電子の持つもう一つの自由度であるスピンを活用し、超低消費電力デバイスに資する Beyond CMOS 技術の有力候補の一つである。金属スピントロニクスでは困難である電荷量の制御が容易であるため、高性能なデバイスを実現できる可能性がある。半導体スピントロニクス材料の最有力候補として強磁性半導体—半導体に希薄量の磁性不純物をドーブした物質—が挙げられるが、これまでもっともさかんに研究されている Mn ドープ GaAs のキュリー温度(強磁性転移温度)は 200 K 未満と室温に届かないため、室温強磁性半導体の出現が望まれていた。

研究代表者は、ワイドギャップ半導体の透明酸化物をベースとした強磁性半導体における室温強磁性発現の可能性に着目し、酸化物ベース磁性半導体の概念を初めて提唱した。そして、Co ドープ TiO₂ が室温強磁性を示すことを発見し、これまでの強磁性半導体のキュリー温度を 600 K まで一気に更新した。しかし、強磁性の起源が強磁性半導体の本質であるキャリア媒介相互作用であるか確証がなく、半導体スピントロニクス材料として活用できるか不明であった。以下に本研究課題の目的を記す。

- (1) Co ドープ TiO₂ が室温強磁性半導体であることを検証し、その室温強磁性の発現メカニズムを解明することで、基礎学理を構築する。
- (2) 室温強磁性半導体の電界効果デバイスなどプロトタイプデバイスの実証やその周辺技術の開発により応用方面にも研究を展開することで、室温動作デバイスも実現可能な透明半導体スピントロニクスの分野を確立する。

4. 研究計画・方法

強磁性の発現に関わる基礎物性の解明から電界効果実験等のデバイス実証まで取り組む。

(1) Co ドープ TiO₂ の基礎物性

Co ドープ TiO₂ の強磁性の発現機構がキャリア媒介相互作用かどうかを実験的に明らかにする。くわえて、強磁性を検出するための異常ホール効果および磁気光学効果のシグナルの増大を図

る。基礎物性として、薄膜表面における磁化の減少の起源、磁化とキュリー温度のキャリア濃度依存性、そして磁気異方性について、共同研究により X 線磁気円二色性分光も用いて調べる。表面磁化の減少はヘテロ構造デバイスの実証に大きな支障となり得るため、起源の解明だけでなく解決策を立てる。また、高温強磁性の起源に関わっている可能性がある結晶構造の乱れを調べるために、原子分解能で試料の構造評価を行う。

(2) 室温強磁性の制御

これまで室温において電界効果により強磁性をオンオフした例はない。Co ドープ TiO_2 をチャンネルとした液体電解質を用いた電気二重層トランジスタにより、室温強磁性の制御を電界効果で行う。ただし、電界効果デバイスを発展させるには、デバイスの全固体素子化が必要である。そこで、電気二重層トランジスタの代替となるデバイス構造を探索し、磁場アシスト磁化反転や電界磁化反転の可能性を検討する。強磁性の制御を直接的に検証するには、磁区構造の観察が有効であるため、Co ドープ TiO_2 の磁区構造観察を試み、電流注入磁化反転の実証へつなげる。

本研究においては、基礎物性データ取得のために各種先端計測技術を専門とする実験グループと共同研究により、元素選択性および表面・バルク選択制のある強磁性の評価ができる X 線磁気円二色性分光、電子状態を調べる X 線光電子分光、元素識別ができる原子分解能を持った透過電子顕微鏡観察、原子の3次元配列を調べられる蛍光 X 線ホログラフィーを行う。未解明である高温強磁性の発現機構については、国内の物性理論や第一原理計算の専門家と共同研究を行う。

国民との科学・技術対話を推進する手段として、現所属の化学専攻で年1回行われている高等学校の生徒向けの理科実験の実施、大学のオープンキャンパスでの研究成果の講演等を行う。

5. 研究成果・波及効果

(1) 主な研究成果

① Co ドープ TiO_2 の基礎物性

これまで、Co ドープ TiO_2 の強磁性の発現機構が未解明であったが、②に述べる室温強磁性の電界効果によるキャリアドーピングの実験と、化学ドーピングによるキャリアドーピングの実験から、電子キャリアが強磁性相互作用を媒介していることが明らかになり、10年にわたる発現機構に関する論争に終止符を打つこととなった。一方、強磁性が発現するキャリア濃度近傍では空間的に不均一な強磁性相が存在することを示唆する結果を得た。これは強相関係 Mn 酸化物でも観測されている現象であり、磁化特性や電気伝導特性の結果を考慮すると、磁気ポーラロンのパーコレーションの描像が適用できる可能性がある。

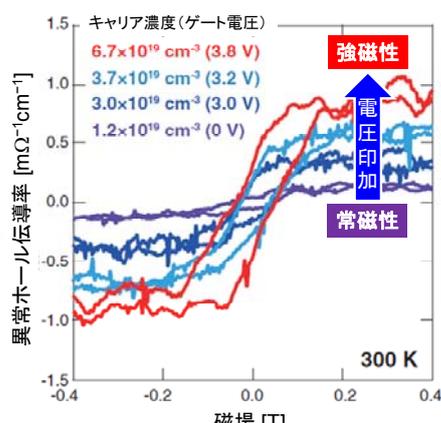
X 線磁気円二色性分光により、 TiO_2 中の Co は 2 価で、Co イオンが強磁性の磁化シグナルを出していることを確認したが、試料表面の磁化が試料内部の磁化より一桁程度も減少していることがわかった。これは光電子分光法でも観測されている表面空乏層の影響による可能性があるが、このような表面磁化の減少はヘテロデバイス等への応用に不利になる可能性がある。しかし

ながら、Coドーピング TiO₂ 表面に 5 分子層程度の極薄の TiO₂ 表面保護層を堆積することで、表面磁化の減少を抑制することができた。

②電界効果物性と室温強磁性の制御

2000 年に初めて電界効果による強磁性の制御が強磁性半導体 GaMnAs において実証されたが[H. Ohno et al., Nature **408**, 944 (2000)]、キュリー温度が低いため動作温度は極低温に限られていた。その後、研究代表者らが提唱した、酸化物半導体を母材とした室温強磁性半導体の報告が相次ぎ、室温強磁性の制御が強く期待されたものの、成功例はなかった。Science 誌が 2005 年

の特集記事—今後四半世紀の科学技術上の 125 個の課題—[Science **309**, 82 (2005)]の一つに「室温で動作する磁性半導体の創出は可能か？」を挙げていることからわかるように、室温強磁性の制御



の実現は困難視されていた。しかし本研究において、比較的シンプルな構造で高電界を印加可能な電気二重層トランジスタを利用することにより、Coドーピング TiO₂ の室温強磁性を電氣的に誘起することに成功した。電界印加により電子キャリアを誘起することで、強磁性交換相互作用が強まり、磁化が増加する(図 1)。これは①で記したように、強磁性の発現機構を解明するうえで重要な結果であるが、室温動作する強磁性半導体スピントロニクスデバイスを実現する、という応用の観点からもきわめて重要な結果である。

電気二重層トランジスタは液体電解質を用いるため、今後は全固体型素子構造の開発も必要である。そこで、厚さ 1 nm のチタン酸化物ナノシートの絶縁特性を調べた結果、約 20 MV/cm の電界下でも絶縁性を保持することがわかり、ゲート絶縁層として高性能をもつことがわかった。また、全固体型電気二重層トランジスタの開発に向けて、固体電解質 LiLaTiO₃ のエピタキシャル薄膜の高品質化に成功した。これらの技術は、今後のトランジスタ開発に有用である。

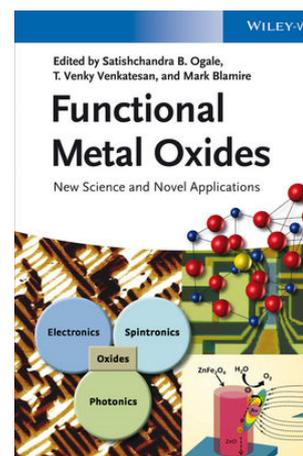
強磁性体はマイクロな磁区構造を持つため、強磁性の制御状態を磁区構造の観察により直接観測することが可能である。これまで Coドーピング TiO₂ の磁区観察は、液体ヘリウム温度において約 10 ミクロンの粗い空間分解能でしか観測されていなかったが、0.1 ミクロンと空間分解能が高い磁気力顕微鏡を用いて、初めて室温における磁区構造の観察に成功した。磁区構造は磁化測定と同様に Co 濃度や電子キャリア密度に依存しており、マイクロな磁性もマクロな磁化特性を反映していることが明らかになった。この手法により、強磁性の制御状態を観測することができる。

③付随する成果

CoドーピングTiO₂の異常ホール効果のシグナルをさらに増強する手段として、スピン軌道相互作用の強い物質との接合の形成が挙げられる。ヘテロ構造に用いる大きなスピン軌道相互作用物質の作製に取り組み、還元性固相エピタキシー法を独自に開発することで、粉末試料の合成が最近報告されたばかりである、Biが-2価という異常な価数をもつ層状物質Y₂O₂Biのエピタキシャル薄膜の作製に初めて成功した。

④成果発表および国民との科学・技術対話の推進

本研究の主たる成果を、幅広い読者層をもちインパクトの高い論文が掲載される Science 誌に論文発表することができ、論文の被引用回数もすでに 100 回を超え、国内外に大きなインパクトを与えることができた。国際学会での招待講演も多数行った。また、本成果にくわえて、研究代表者がこれまで分野を主導してきた磁性酸化物半導体の研究に関する著書が Wiley 社の酸化物エレクトロニクスに関する専門書の 1 章として出版され(図 2)、代表者が 10 年以上前に創製した磁性酸化物半導体が磁性材料の一つとして国際的に認知された。また、強磁性半導体の電界効果に関する総説を含む専門書も同社から 2014 年に出版予定である。最新の研究成果を専門書にまで盛り込むという稀な機会を得ることができた。国民との科学・技術対話の推進に関しては、所属機関の協力もあり、限られた期間に何回も行うことができた。本成果のポスター発表や一般向けの講演、そして高校生に対する実験指導やラボツアーを行った。



(2)研究の目的に対する達成度

電界誘起室温強磁性を初めて実現し、その成果を著名な Science 誌に論文発表し、よいタイミングでこれまでの研究成果も含めて 2 冊の専門書にもそれぞれ一章を著した。すなわち、成果の発信を非常に効率よく行うことができた。磁区構造の観測や表面磁化の減少など、室温強磁性の微視的現象の観測に成功し、表面磁化の減少の抑制や全固体型電界効果素子の要素技術の開発といった応用への基盤技術も得られており、今後の展開が期待できる。また、還元性固相エピタキシーの開発によるビスマス層状酸化物のエピタキシャル薄膜化に成功し、新物質や新物性の発見にもつながった。総じて、本研究の達成度は、おおむね順調に進展しているといえる。

(3)関連研究分野の進展や国民生活における社会的・経済的な課題解決への波及効果

酸化物や窒化物を母材とした室温強磁性半導体の報告が 10 年以上にわたり続いている。当初は、強磁性の発現機構が未解明で強磁性半導体の性質をもつかどうか不明であった。本研究において室温強磁性を電界効果で制御できたことで、デバイスの室温動作が原理的に可能になった。室温における磁区の生成・消滅や低電流密度での磁壁移動が可能なることから、スピントロニクスデバイスに高機能を付与することが期待できる。母体の TiO₂ は省エネルギーで注目されている透明エレクトロニクス材料で環境調和性の高い酸化物半導体であり、透明半導体スピントロニクスデ

様式21

バースの実現も可能である。本研究により透明なデバイスができあがると、窓ガラスやディスプレイ表面、さらには衣服などあらゆる場所に存在するユビキタスなデバイスとなりえる。究極的には、すでに実在する透明な電子デバイスや発光デバイスと組み合わせた、透明な超低消費電力のコンピューターの実現が可能である。

6. 研究発表等

<p>雑誌論文</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計 8 件</p>
<p>計 11 件</p>	<p>Yoshinori Yamada, Kazunori Ueno, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Hongtao Yuan, Hidekazu Shimotani, Yoshihiro Iwasa, Lin Gu, Susumu Tsukimoto, Yuichi Ikuhara, Masashi Kawasaki “Electrically-induced ferromagnetism at room temperature in cobalt-doped titanium dioxide” Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011). ISSN 0036–8075 (print), 1095–9203 (online) http://dx.doi.org/10.1126/science.1202152</p> <p>Yoshinori Yamada, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Kazunori Ueno, Masashi Kawasaki “Control of ferromagnetism at room temperature in (Ti,Co)O_{2-δ} via chemical doping of electron carriers” Applied Physics Letters, Vol. 99, No. 242502, p. 1–3 (2011) ISSN: 0003–6951 (print), 1077–3118 (online) http://dx.doi.org/10.1063/1.3669505</p> <p>Vijay Raj Singh, Yuta Sakamoto, Takashi Kataoka, Masaki Kobayashi, Yo Yamazaki, Atsushi Fujimori, Fan-Hsiu Chang, Di-Jing Huang, Hong-Ji Lin, Chien-Te Chen, Hidemi Toyosaki, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Masashi Kawasaki “Bulk and surface magnetization of Co atoms in rutile Ti_{1-x}Co_xO_{2-δ} thin films revealed by X-ray magnetic circular dichroism” Journal of Physics: Condensed Matter, Vol. 23, No. 176001, p. 1–5 (2011). ISSN (printed): 0953–8984. ISSN (electronic): 1361–648X http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/23/17/176001</p> <p>福村知昭【依頼執筆】 “(Ti,Co)O₂ の電界誘起室温強磁性: 室温強磁性の起源を求めて” 固体物理, 46, 809–816 (2011). ISSN: 0454–4544</p> <p>Vijay Raj Singh, Keisuke Ishigami, Virendra Kumar Verma, Goro Shibata, Yoh Yamazaki, Takashi Kataoka, Atsushi Fujimori, Fan-Hsiu Chang, D.-J. Huang, Hong-Ji Lin, Chien-Te Chen, Yoshinori Yamada, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Masashi Kawasaki “Ferromagnetism of cobalt-doped anatase TiO₂ studied by bulk- and surface-sensitive soft x-ray magnetic circular dichroism” Applied Physics Letters, Vol. 100, No. 242404, p. 1–5 (2012). ISSN: 0003–6951 (print); 1077–3118 (online) http://dx.doi.org/10.1063/1.4729123</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u>, Yoshinori Yamada, Kazunori Ueno, Hongtao Yuan, Hidekazu Shimotani, Yoshihiro Iwasa, Lin Gu, Susumu Tsukimoto, Yuichi Ikuhara, Masashi Kawasaki 【依頼執筆】 “Room temperature ferromagnetism induced by electric field in cobalt-doped TiO₂” ECS Transactions, Vol. 50, Issue 4, p. 53–57 (2013) ISSN: 1938–6737 (print); 1938–5862 (online) http://dx.doi.org/10.1149/05004.0053ecst</p>

	<p><u>Tomoteru Fukumura</u>, Yoshinori Yamada, Kazunori Ueno, Hongtao Yuan, Hidekazu Shimotani, Yoshihiro Iwasa, Lin Gu, Susumu Tsukimoto, Yuichi Ikuhara, Masashi Kawasaki 【依頼執筆】 “Electron carrier-mediated room temperature ferromagnetism in anatase (Ti,Co)O₂” Spin, Vol. 2, No. 1230005, p. 1-10 (2013). ISSN: 2010-3247 (print); 2010-3255 (online) http://dx.doi.org/10.1142/S2010324712300058</p> <p>Daisuke Ogawa, Kosho Akasaka, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Minoru Osada, Takayoshi Sasaki, Tetsuya Hasegawa “Fabrication and properties of microcapacitors with a one-nanometer-thick single Ti_{0.87}O₂ nanosheet” Chemistry Letters, Vol. 43, No. 3, p. 307-309 (2014). ISSN: 0366-7022 (print); 1348-0715 (online) http://dx.doi.org/10.1246/cl.130925</p> <p>(掲載済み一査読無し) 計 3 件</p> <p><u>福村知昭</u> 【依頼執筆】 “透明酸化物半導体酸化チタンをベースとした室温強磁性半導体の開発” FC Report, Vol. 30, No. 1 (冬号), p. 22-27 (2012). ISSN: 0911-5269 http://ci.nii.ac.jp/naid/40019182533</p> <p><u>福村知昭</u> 【依頼執筆】 “酸化物強磁性半導体の電界スピン制御” 応用電子物性分科会誌, Vol. 18, No. 5, p. 180-183 (2012). ISSN: 1341-5123</p> <p><u>福村知昭</u>, Thantip S. Krasienapibal, 清良輔, 長谷川哲也 【依頼執筆】 “パルスレーザー堆積法による磁性酸化物薄膜のエピタキシャル成長” 日本磁気学会研究会研究会資料, Vol. 192, p. 33-37 (2013). ISSN: 1882-2940 http://ci.nii.ac.jp/naid/40019880080</p> <p>(未掲載) 計 0 件</p>
<p>会議発表 計 35 件</p>	<p>専門家向け 計 33 件</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Electric field effect on room temperature ferromagnetism in magnetic oxide semiconductor” International Workshop on Spin Current, Sendai, Japan, 2011 年 7 月 25-28 日. [Tohoku University]</p> <p>山田良則, 上野和紀, <u>福村知昭</u>, 袁洪涛, 下谷秀和, 岩佐義宏, 谷林, 着本享, 幾原雄一, 川崎雅司 “コバルトドーブ二酸化チタンのキャリア媒介室温強磁性とその電界制御” 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山市, 2011 年 9 月 21-24 日. [日本物理学会]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Electrically induced ferromagnetism at room temperature in a magnetic oxide semiconductor” The 2nd International Symposium on Hybrid Materials and Processing (HyMap 2011), Busan, Korea, 2011 年 10 月 27-29 日. [GLOBAL FRONTIER R&D Center for Hybrid Interface Materials, NCRC for Hybrid Materials Solution, Pusan National University]</p>

	<p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Room temperature ferromagnetism in dilute-doped oxide semiconductors” ICC-IMR Workshop on Novel Material Science by Neutron Scattering – Polarization Analysis & Cross-correlation Method – A Satellite Workshop of 1st AOCNS, Sendai, Japan, 2011 年 11 月 18-19 日. [Center of Neutron Science for Advanced Materials, Institute for Materials Research, Tohoku University]</p> <p><u>福村知昭</u> 【招待講演】 “強磁性酸化物半導体の電界誘起室温強磁性: 高温強磁性の起源” 第 16 回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-16), 東京, 2011 年 11 月 28-29 日. [東京工業大学]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Electrical control of ferromagnetism at room temperature in ferromagnetic oxide semiconductor” 39th Conference on the Physics and Chemistry of Surfaces and Interfaces (PCSI-39), Santa Fe, USA, 2012 年 1 月 22-26 日. [American Vacuum Society]</p> <p>Yoshinori Yamada, Kazunori Ueno, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Hongtao Yuan, Hidekazu Shimotani, Yoshihiro Iwasa, Lin Gu, Susumu Tsukimoto, Yuichi Ikuhara, Masashi Kawasaki “Electric field manipulation of room temperature ferromagnetism in anatase $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$” APS March Meeting 2012, Boston, USA, 2012 年 2 月 27 日-3 月 2 日. [American Physical Society]</p> <p><u>福村知昭</u> 【招待講演】 “ワイドギャップ強磁性半導体デバイス” 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 東京, 2012 年 3 月 15-18 日. [応用物理学会]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Electrically Induced Ferromagnetism at Room Temperature in Cobalt-Doped Titanium Dioxide” Intermag 2012, Vancouver, Canada, 2012 年 5 月 7-11 日. [IEEE Magnetics Society]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “High temperature ferromagnetism in doped oxides: from the birth to electrical control, and the mechanism” 41st “Jaszowiec” International School & Conference on the Physics of Semiconductors, Krynica, Poland, 2012 年 6 月 8-15 日. [Polish Academy of Sciences]</p> <p>小川大輔, <u>福村知昭</u>, 長田実, 佐々木高義, 長谷川哲也 “単一高誘電率ナノシートの絶縁特性” 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学学会学術講演会, 愛媛市, 2012 年 9 月 11-14 日. [応用物理学会]</p> <p>井上俊, <u>福村知昭</u>, 長谷川哲也 “室温強磁性半導体(Ti,Co)O₂の磁区構造の観測” 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学学会学術講演会, 愛媛市, 2012 年 9 月 11-14 日. [応用物理学会]</p> <p>清良輔, <u>福村知昭</u>, 長谷川哲也 “Bi²⁺二次元正方格子を含む Y₂O₂Bi 薄膜のエピタキシャル成長” 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学学会学術講演会, 愛媛市, 2012 年 9 月 11-14 日. [応用物理学会]</p>
--	---

	<p>Jie Wei, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Tetsuya Hasegawa “Epitaxial growth of $\text{Li}_x\text{La}_{2/3-x}\text{TiO}_3$ thin films on perovskite substrates by pulsed laser deposition” 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学会学術講演会, 愛媛市, 2012 年 9 月 11-14 日. [応用物理学会]</p> <p>Thantip S. Krasienapibal, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Yasushi Hirose, Tetsuya Hasegawa “Enhanced mobility in self-buffered anatase TiO_2 grown at low temperature” 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学会学術講演会, 愛媛市, 2012 年 9 月 11-14 日. [応用物理学会]</p> <p>Thantip S. Krasienapibal, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Yasushi Hirose, Tetsuya Hasegawa “Low temperature epitaxial growth of anatase TiO_2 thin film by pulsed laser deposition” The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2012), Nara, Japan, 2012 年 9 月 23-28 日. [The Japan Society of Applied Physics]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Electric field induced room temperature ferromagnetism in transition metal doped oxide semiconductor” 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012), Kyoto, Japan, 2012 年 9 月 25-27 日. [The Japan Society of Applied Physics]</p> <p>Shun Inoue, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Tetsuya Hasegawa “Observation of magnetic domain structure in room temperature ferromagnetic semiconductor $(\text{Ti,Co})\text{O}_2$” 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012), Kyoto, Japan, 2012 年 9 月 25-27 日. [The Japan Society of Applied Physics]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Room temperature ferromagnetism induced by electric field in cobalt-doped TiO_2” Pacific RIM Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRIME 2012)/222nd Meeting of ECS, Hawaii, USA, 2012 年 10 月 7-12 日. [The Electrochemical Society]</p> <p><u>福村知昭</u> 【招待講演】 “酸化物強磁性半導体の電界スピンの制御” 応用電子物性分科会・スピントロニクス研究会 共催研究会「強磁性体のスピン制御技術とその展望」, 東京, 2012 年 11 月 21 日. [応用物理学会]</p> <p><u>福村知昭</u> 【招待講演】 “酸化物薄膜合成と物質・物性探索” 分子研研究会「無機化学の現状と未来:若い世代が切り開く新しいサイエンス」, 岡崎市, 2013 年 1 月 18-19 日. [分子科学研究所]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Electrically-induced ferromagnetism at room temperature in $(\text{Ti,Co})\text{O}_2$: carrier-mediated ferromagnetism” APS March Meeting 2013, Baltimore, USA, 2013 年 3 月 18-22 日. [American Physical Society]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Carrier-mediated ferromagnetism in $(\text{Ti,Co})\text{O}_2$ and the electrical control at room temperature” EMN EAST Meeting -Energy Materials Nanotechnology-, Peking, China, 2013 年 9 月 7-10 日. [Open-Access House of Science and Technology (OAHOST)]</p>
--	--

	<p>Thantip S. Krasienapibal, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Y. Hirose, Ryuta Sako, Masanori Nagao, Satoshi Watauchi, Isao Tanaka, Tetsuya Hasegawa “Electrical transport properties of self-buffered anatase TiO₂” 2013 年秋季 第 74 回 応用物理学学会学術講演会, 京田辺市, 2013 年 9 月 16-20 日. [応用物理学学会]</p> <p><u>福村知昭</u> 【依頼講演】 “新磁性半導体: 材料探索” 秋のスピンロニクス特別研究会, 刈田郡, 2013 年 10 月 17-19 日. [東北大学電気通信研究所]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Room temperature ferromagnetism in (Ti,Co)O₂: the electrical control and the mechanism” EMN Open Access Weak, Chengdu, China, 2013 年 10 月 21-27 日. [Open-Access House of Science and Technology (OAHOST)]</p> <p><u>福村知昭</u>, Thantip S. Krasienapibal, 長谷川哲也 【招待講演】 “パルスレーザー堆積法による磁性酸化物薄膜のエピタキシャル成長” 日本磁気学会第 192 回研究会「磁性薄膜成膜技術の向上と新展開」, 東京, 2013 年 11 月 19 日. [日本磁気学会]</p> <p>Daisuke Ogawa, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Minoru Osada, Takayoshi Sasaki, Tetsuya Hasegawa “Insulating and dielectric properties of an individual titania nanosheet” 2013 MRS Fall Meeting, Boston, USA, 2013 年 12 月 1-6 日. [Materials Research Society]</p> <p>田中悠太, 八方直久, 藤原真, 田中公一, 井上伸, 福村知昭, 長谷川哲也, 林好一, 細川伸也 “高温強磁性半導体アナターゼ型 Co:TiO₂ の三次元局所構造解析” 日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 広島市, 2014 年 1 月 11-13 日. [日本放射光学会]</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> 【招待講演】 “Toward transparent flexible spintronics using RT ferromagnetic semiconductor” 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17-20 日. [応用物理学学会]</p> <p>神永健一, 清良輔, <u>福村知昭</u>, 長谷川哲也 “還元条件下で作製したイットリウム酸化物エピタキシャル薄膜” 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17-20 日. [応用物理学学会]</p> <p>Thantip S. Krasienapibal, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Tetsuya Hasegawa “Improved magnetization in (Ti,Co)O₂ with non-magnetic capping layer” 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17-20 日. [応用物理学学会]</p> <p>Jie Wei, <u>Tomoteru Fukumura</u>, Yasushi Hirose, Tetsuya Hasegawa “Epitaxial growth of Li_{3-x}La_{2/3-x}TiO₃ thin films on perovskite substrates by pulsed laser deposition” 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17-20 日. [応用物理学学会]</p>
--	---

	<p>一般向け 計 2 件</p> <p><u>福村知昭</u> “物質の中に広がる量子の世界” 東京大学理学部オープンキャンパス 2013, 東京, 2013 年 8 月 7-8 日. [東京大学理学系研究科 (東京大学と共催)]</p> <p><u>福村知昭</u>(代理ポスター発表: Thantip S. Krasienapibal) “透明半導体スピントロニクス基礎と応用” FIRST シンポジウム「『科学技術が拓く 2030 年』へのシナリオ」, 東京, 2014 年 2 月 28 日-3 月 1 日. [株式会社早稲田総研イニシアティブ]</p>
<p>図 書</p> <p>計 2 件</p>	<p><u>Tomoteru Fukumura, Masashi Kawasaki</u> “Magnetic oxide semiconductors: on the high-temperature ferromagnetism in TiO₂- and ZnO-based compounds” Functional Metal Oxides: New Science and Novel Applications, edited by Satishchandra Balkrishna Ogale, Thirumalai Venky Venkatesan, Mark Vlamire, (Wiley-VCH, Weinheim, 2013), p. 89-131, 計 498 ページ, ISBN: 978-3-527-33179-6 http://as.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-3527331794.html</p> <p><u>Tomoteru Fukumura</u> “Electric-field control of magnetism in ferromagnetic semiconductors” Spintronics for Next Generation Innovative Devices, Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectric Applications, edited by Katsuaki Sato, Eiji Saitoh, Arthur Willoughby, Peter Capper, Safa Kasap, (Wiley, 2014), 計 264 ページ, ISBN: 978-1-118-75191-6, 2014 年 11 月出版予定 http://as.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118751914,subjectCd-PH61.html</p>
<p>産業財産権 出願・取得状 況</p> <p>計 0 件</p>	<p>(取得済み) 計 0 件</p> <p>(出願中) 計 0 件</p>
<p>Webページ (URL)</p>	<p>「電圧で磁気を制御できる新しいトランジスターの開発に成功」 東京大学大学院理学系研究科プレスリリース http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2011/13.html</p> <p>「東京大学理学部オープンキャンパス 2013 講演会」 東京大学大学院理学系研究科・理学部 イベント情報 http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/event/open-campus/2013/ http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/event/open-campus/2013/pdf/pre4.pdf</p>
<p>国民との科 学・技術対話 の実施状況</p>	<p>東京大学理学部連携講座 太陽電池に関する講義と実験 日時:平成 23 年 12 月 3 日; 場所:東京大学理学部化学科 対象者:高校 1 年生約 20 名と化学の教諭 1 名 東京大学教育学部附属中等教育学校の高校 1 年生約 20 名と化学の教諭 1 名を招き、「太陽電池—エネルギー問題への化学からのアプローチ—」と題する講義を行い、そのあとでコーヒーや紅茶など様々な物質を色素として用いた色素増感太陽電池の作製と性能測定を行った。アンケートをとって感想を聞いたところ、講義および実験は大変好評であった。</p>

<p>ポスター展示「未来からの招待状」 日時:平成24年8月7日 9時~16時; 場所:東京大学安田講堂 対象者:一般; 参加人数 442名 内容:オープンキャンパスに際し、安田講堂の2階通路において、「未来からの招待状」と題したポスター展示を行った。参加を希望した最先端・次世代研究開発支援プログラムの補助事業者42名の全ポスターを展示した。また、展示と併せて、来場者にコメントを書いてもらい、その場でポスターと掲示するとともに、展示についてのアンケートを実施した。</p> <p>ポスター展示「未来からの招待状」 日時:平成24年8月31日~9月6日; 場所:東京大学医学部附属病院ロビー 対象者:一般; 参加人数:病院の外来来院者は一日あたり約3000名 内容:最先端・次世代研究開発支援プログラムのポスター展示を行った。展示と併せて、来場者にコメントを書いてもらい、その場でポスターと掲示するとともに、展示についてのアンケートを実施した。</p> <p>ポスター展示「未来からの招待状」 日時:平成24年10月20日 9時~15時; 場所:東京大学安田講堂 対象者:一般; 参加者人数:約150名 内容:東京大学のホームカミングデイにおいて、最先端・次世代研究開発支援プログラムのポスター展示を行った。今回の展示では、過去の展示で集まったコメントをポスターと共に展示した。また、展示と併せて、今回も来場者にコメントを書いてもらい、その場でポスターとともに掲示するとともに、展示についてのアンケートを実施した。</p> <p>研究室見学企画 「東大の研究室をのぞいてみよう!」プログラム 日時:平成24年12月21日10時30分~11時30分 対象者:高校生および高校教員; 参加者人数:3名 内容:兵庫県滝川第二高校の高校生と教員の方々を対象に、研究室見学を実施した。研究室の大学院生8名がそれぞれの研究テーマの内容や使用している実験機器の紹介を行った。アンケートから見学は大変好評であった。</p> <p>ポスター展示「未来からの招待状」 日時:平成25年1月16、17日; 場所:文京区シビックセンター 対象者:一般;参加者人数:約150名 内容:文京シビックセンターB2F「区民ひろば」において、最先端・次世代研究開発支援プログラムのポスター展示を行った。今回の展示では、過去の展示で集まったコメントと研究者から集まったコメントへの回答もポスターと共に展示した。</p> <p>東京大学理学部オープンキャンパス2013 一般向け講演会 日時:平成25年8月7日; 場所:東京大学理学部化学本館講堂 対象者:一般(主に高校生); 参加人数:約70名 内容:最先端・次世代研究開発支援プログラムのプロジェクトのバックグラウンドとなる、物質の量子現象について「物質の中に広がる量子の世界」と題して、1時間講演を行った。</p> <p>FIRSTシンポジウム「『科学技術が拓く2030年』へのシナリオ」ポスター発表 日時:平成26年3月1日; 場所:ベルサール新宿グランド 対象者:一般; 参加人数:約200名 内容:科学技術に興味のある一般人から研究者まで幅広い対象者に対して、NEXTプロジェクトの成果発表をポスター発表で行った。</p>
--

<p>新聞・一般雑誌等掲載 計 18 件</p>	<p>○新聞掲載</p> <p>科学新聞, 2011 年 2 月 18 日, 5 ページ 「第 7 回日本学術振興会賞 25 氏に」</p> <p>科学新聞, 2011 年 3 月 18 日, 6 ページ 「優れた能力持つ若手研究者」</p> <p>日刊工業新聞, 2011 年 5 月 27 日, 28 ページ 「東大、室温で4ボルトの低電圧で磁気制御できるトランジスタ開発」</p> <p>化学工業日報, 2011 年 5 月 27 日, 1 ページ 「東大、トランジスタ開発、酸化チタン利用し電圧で磁気制御」</p> <p>日経産業新聞, 2011 年 5 月 27 日, 11 ページ 「半導体素子、消費電力ほぼゼロに、東大など開発、室温での動作実現。」</p> <p>科学新聞, 2011 年 6 月 10 日, 4 ページ 「室温条件下、電圧で磁気を制御 磁気メモリデバイスへ応用期待」</p> <p>○雑誌等掲載</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 Science, Vol. 332, p. 1040 (2011). “Chameleon Magnets” ISSN 0036–8075 (print), 1095–9203 (online) http://dx.doi.org/10.1126/science.1205775</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 Nature Nanotechnology Vol. 6, p. 400–401 (2011). “Superconductivity at the double” ISSN: 1748–3387, EISSN: 1748–3395 http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2011.104</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 NPG Asia Materials featured highlight “Spintronics: Room-temperature electrical control” ISSN 1884–4049 (print), 1884–4057 (online). http://dx.doi.org/10.1038/asiamat.2011.140</p> <p>○ウェブ等掲載</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 nanotech Japan 「電圧で磁気を制御できる新しいトランジスタの開発に成功～室温での電気的な方法で磁性のスイッチング(“カメレオン”磁性)に道～」 https://nanonet.nims.go.jp/modules/news/article.php?a_id=1094</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 マイナビニュース 「東大ら、酸化半導体を活用し電圧で磁気を制御できるトランジスタを開発」 http://news.mynavi.jp/news/2011/05/27/093/</p>
------------------------------	---

	<p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 AiM Research 「スピニエレクトロニクス: 磁性を制御する」 http://research.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jpn/research/634</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 Nanowerk “Ferromagnetism can be induced electrically at room temperature” http://www.nanowerk.com/news/newsid=22793.php</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 physicworld.com “Semiconductor shows its chameleon side” http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/may/27/semiconductor-shows-its-chameleon-side</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 SciTech Profiles Asia Pacific “Ferromagnetic switching at room temperature (JPN)” http://www.scitechpap.com/?p=830</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 Asia Research News “Electrical Switching between Paramagnetic and Ferromagnetic States (“Chameleon” Magnets) in Cobalt-Doped Titanium Dioxide” http://www.researchsea.com/html/article.php/aid/6299/cid/2/research/electrical_switching_between_paramagnetic_and_ferromagnetic_states__chameleon_magnets_in_cobalt-doped_titanium_dioxide.html?PHPSESSID=4n72mqlrgcs9tn2ifdhj6lnan0</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 Das Physikportal, pro-physik.de “Elektrisch angeregter Ferromagnetismus” http://www.pro-physik.de/details/news/1110849/Elektrisch_angeregter_Ferromagnetismus.html</p> <p>論文[Science, Vol. 332, p. 1065–1067 (2011)]の紹介 Spintronics-Info.com “Electric ferromagnetism at room temperature shown in cobalt-doped titanium dioxide” http://www.spintronics-info.com/electric-ferromagnetism-room-temperature-shown-cobalt-doped-titanium-dioxide</p> <p>その他、ウェブやブログで成果が取り上げられる。</p>
<p>その他</p>	<p>東京大学理学部ニュース 2010 年度 3 月号 (印刷版もあり) 「第 7 回日本学術振興会賞を本研究科化学専攻の教授 2 名が受賞」 http://www.s.u-tokyo.ac.jp/info/topics/201103/02.html</p> <p>「サイエンス誌に載った日本人研究者」(American Association for the Advancement of Science (AAAS), 2012 年) 35 ページ目に本人および研究グループの写真と研究内容が掲載。</p> <p>Virtual J. Nanoscale Sci. Technol., 23, June 6th, (2011)に Science 誌論文が選出される。</p>

7. その他特記事項

平成 22 年度第 7 回(平成 22 年度)日本学術振興会賞 受賞 「磁性酸化物半導体の創成」