

**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)  
実施状況報告書(平成 23 年度)**

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	国立大学法人東京大学・大学院理学系研究科・准教授
氏名	福村 知昭

### 1. 当該年度の研究目的

Coドーピング TiO<sub>2</sub> の室温強磁性の交換相互作用を媒介するものがキャリアかどうか 10 年にわたる議論があったが、電界効果により室温強磁性を誘起することでキャリア媒介強磁性であることを検証できた。この実験結果を世界に強く発信するために、一流学術雑誌に論文を掲載する。また、この実験結果を強くサポートする、化学ドーピング法を用いた電子キャリアドーピングによる強磁性の制御の結果も広く発信する。これらの成果を発展させるために、高電界印加が可能な全固体素子トランジスタや薄膜の磁気状態の評価を開始する。そして、得られた研究成果の情報発信をおこなっていく。また、得られた研究成果の情報発信や、国民との科学・技術対話についても継続的に進めていく。

### 2. 研究の実施状況

Coドーピング TiO<sub>2</sub> は 600 ケルビンという高いキュリー温度を示す強磁性体であるが、その強磁性が電子キャリアによって媒介されるかどうか議論されており、電界効果で強磁性を制御できるかが大きな焦点となっていた。我々は電界効果で室温強磁性を誘起することに成功したが、この成果を広く発信するために一流学術雑誌への掲載を試み、この分野でトップレベルのインパクトを持つ Science 誌に論文が掲載された。そして引き続き、新聞記事や解説記事が出版される等の反響もあった。この結果は非磁性体を電圧印加により室温強磁性体に変化させることを初めて実証したもので、産業上も興味深く、今後の展開が期待される。また化学ドーピング法により Coドーピング TiO<sub>2</sub> の電子濃度をさらに広い範囲でふった結果、キャリア濃度の増加に伴う明瞭な絶縁体から金属的な電気伝導への転移および常磁性から強磁性への転移が見られ、電界効果の実験を再検証する結果となったが、この結果は Applied Physics Letter 誌に論文が掲載された。薄膜の表面と内部の磁化を区別して評価できる X 線磁気円二色性分光法により、表面における磁化が内部より著しく小さいことも論文発表したが、これは表面空乏層における磁化の減少という強磁性半導体一般に見られる現象を観測していると考えられる。今後、強磁性の制御法を開発していくために、高電界効果を可能にする固体素子構造の検討や、薄膜の磁気状態の空間分布の評価を開始している。全固体素子トランジスタ構造の開発については、キーとなるゲート絶縁層として複数の材料を現在ピックアップしており、今後はトランジスタ構造の検討を行っていく予定である。また、講義・実験を通じて、高校生に対してアウトリーチ活動を行った。

3. 研究発表等

<p>雑誌論文 計5件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計4件                  Y. Yamada, K. Ueno, <u>T. Fukumura</u>, H. T. Yuan, H. Shimotani, Y. Iwasa, L. Gu, S. Tsukimoto, Y. Ikuhara, M. Kawasaki, "Electrically-induced ferromagnetism at room temperature in cobalt-doped titanium dioxide" Science <b>332</b>, 1065-1067 (2011).                  ISSN 0036-8075 (print), 1095-9203 (online)  <a href="http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/332/6033/1065?ijkey=rha7DO15/UvWQ&amp;keytype=ref&amp;siteid=sci">http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/332/6033/1065?ijkey=rha7DO15/UvWQ&amp;keytype=ref&amp;siteid=sci</a>  <a href="http://www.sciencemag.org/cgi/rapidpdf/332/6033/1065?ijkey=rha7DO15/UvWQ&amp;keytype=ref&amp;siteid=sci">http://www.sciencemag.org/cgi/rapidpdf/332/6033/1065?ijkey=rha7DO15/UvWQ&amp;keytype=ref&amp;siteid=sci</a></p> <p>Y. Yamada, <u>T. Fukumura</u>, K. Ueno, M. Kawasaki, "Control of ferromagnetism at room temperature in (Ti,Co)O<sub>2-δ</sub> via chemical doping of electron carriers" Applied Physics Letters <b>99</b>, 242502-1-3 (2011)                  ISSN: 0003-6951 (print), 1077-3118 (online)</p> <p>V. R. Singh, Y. Sakamoto, T. Kataoka, M. Kobayashi, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, D.-J. Huang, H.-J. Lin, C. T. Chen, H. Toyosaki, <u>T. Fukumura</u>, M. Kawasaki, "Bulk and surface magnetization of Co atoms in rutile Ti<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>2-δ</sub> thin films revealed by X-ray magnetic circular dichroism" Journal of Physics: Condensed Matter <b>23</b>, 176001-1-5 (2011).</p> <p><u>福村知昭</u>, "(Ti,Co)O<sub>2</sub> 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 <b>46</b>, 809-816 (2011).                  ISSN: 0454-4544</p> <p>(掲載済み一査読無し) 計1件  <u>福村知昭</u>, "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), 22-27 (2012).</p> <p>(未掲載) 計0件</p>
<p>会議発表 計8件</p>	<p>専門家向け 計8件  <u>T. Fukumura</u>, "Electric field effect on room temperature ferromagnetism in magnetic oxide semiconductor" International Workshop on Spin Current, Sendai, Japan, 2011/7/25-28. [招待講演]</p> <p><u>T. Fukumura</u>, "Electrically induced ferromagnetism at room temperature in a magnetic oxide semiconductor" The 2nd International Symposium on Hybrid Materials and Processing (HyMap 2011), Busan, Korea, 2011/10/27-29. [招待講演]</p> <p><u>T. Fukumura</u>, "Room temperature ferromagnetism in dilute-doped oxide semiconductors" ICC-IMR Workshop on Novel Material Science by Neutron Scattering - Polarization Analysis &amp; Cross-correlation Method - A Satellite Workshop of 1st AOCNS, Sendai, Japan, 2011/11/18-19. [招待講演]</p> <p><u>T. Fukumura</u>, "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, 2012/1/22-26. [招待講演]</p> <p>Y. Yamada, K. Ueno, <u>T. Fukumura</u>, H. T. Yuan, H. Shimotani, Y. Iwasa, L. Gu, S. Tsukimoto, Y. Ikuhara, M. Kawasaki, "Electric field manipulation of room temperature ferromagnetism in anatase Ti<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>2-δ</sub>" APS March Meeting 2012, Boston, USA, 2012/2/27-3/2.</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, 2011/9/21-24.</p> <p><u>福村知昭</u>, "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" 東京, 第 16 回 半導体スピン工学の基礎と応用 (PASPS-16), 2011/11/28-29. [招待講演]</p>

様式19 別紙1

	<p>福村知昭, “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, 2012/3/15-18. [招待講演]</p> <p>一般向け 計0件</p>
<p>図書</p> <p>計0件</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 <a href="http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2011/13.html">http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2011/13.html</a></p>
<p>国民との科 学・技術対話 の実施状況</p>	<p>2011 年 12 月 3 日に、東京大学理学部の連携講座において、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、東京大学理学部化学科において講義と実験を行った。「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>新聞・一般雑 誌等掲載 計16件</p>	<p>日刊工業新聞, 2011/5/27, 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, 2011/5/27, 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, 2011/5/27, 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, 2011/6/10, 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>Science <b>332</b>, 1040 (2011). “Chameleon Magnets” ISSN 0036-8075 (print), 1095-9203 (online)</p> <p>Nature Nanotechnology <b>6</b>, 400-401 (2011). “Superconductivity at the double” ISSN: 1748-3387, EISSN: 1748-3395</p> <p>NPG Asia Materials featured highlight   doi:10.1038/asiamat.2011.140, “Spintronics: Room-temperature electrical control” ISSN 1884-4049 (print), 1884-4057 (online).</p> <p>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～」 <a href="https://nanonet.nims.go.jp/modules/news/article.php?a_id=1094">https://nanonet.nims.go.jp/modules/news/article.php?a_id=1094</a></p> <p>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」 <a href="http://news.mynavi.jp/news/2011/05/27/093/">http://news.mynavi.jp/news/2011/05/27/093/</a></p> <p>AiM Research, 「スピネレクトロニクス: 磁性を制御する」 <a href="http://research.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jpn/research/634">http://research.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jpn/research/634</a></p> <p>Nanowerk, “Ferromagnetism can be induced electrically at room temperature” <a href="http://www.nanowerk.com/news/newsid=22793.php">http://www.nanowerk.com/news/newsid=22793.php</a></p> <p>physicworld.com, “Semiconductor shows its chameleon side” <a href="http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/may/27/semiconductor-shows-its-chameleon-side">http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/may/27/semiconductor-shows-its-chameleon-side</a></p> <p>SciTech Profiles Asia Pacific, “Ferromagnetic switching at room temperature (JPN)” <a href="http://www.scitechpap.com/?p=830">http://www.scitechpap.com/?p=830</a></p>

様式19 別紙1

	<p>Asia Research News, "Electrical Switching between Paramagnetic and Ferromagnetic States ("Chameleon" Magnets) in Cobalt-Doped Titanium Dioxide"  <a href="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=4n72mq1rgcs9tn2ifdhj6lnan0">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=4n72mq1rgcs9tn2ifdhj6lnan0</a></p> <p>Das Physikportal, pro-physik.de, "Elektrisch angeregter Ferromagnetismus"  <a href="http://www.pro-physik.de/details/news/1110849/Elektrisch_angeregter_Ferromagnetismus.html">http://www.pro-physik.de/details/news/1110849/Elektrisch_angeregter_Ferromagnetismus.html</a></p> <p>Spintronics-Info.com, "Electric ferromagnetism at room temperature shown in cobalt-doped titanium dioxide"  <a href="http://www.spintronics-info.com/electric-ferromagnetism-room-temperature-shown-cobalt-doped-titanium-dioxide">http://www.spintronics-info.com/electric-ferromagnetism-room-temperature-shown-cobalt-doped-titanium-dioxide</a></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>「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., <b>23</b>, June 6th, (2011)に Science 誌論文が選出される。</p>

4. その他特記事項

## 実施状況報告書(平成23年度) 助成金の執行状況

本様式の内容は一般に公表されず

## 1. 助成金の受領状況(累計)

(単位:円)

	①交付決定額	②既受領額 (前年度迄の 累計)	③当該年度受 領額	④(=①-②- ③)未受領額	既返還額(前 年度迄の累 計)
直接経費	119,000,000	55,860,000	0	63,140,000	0
間接経費	35,700,000	16,758,000	0	18,942,000	0
合計	154,700,000	72,618,000	0	82,082,000	0

## 2. 当該年度の収支状況

(単位:円)

	①前年度未執 行額	②当該年度受 領額	③当該年度受 取利息等額 (未収利息を除 く)	④(=①+②+ ③)当該年度 合計収入	⑤当該年度執 行額	⑥(=④-⑤) 当該年度未執 行額	当該年度返還 額
直接経費	55,836,220	0	0	55,836,220	55,836,220	0	0
間接経費	16,758,000	0	0	16,758,000	16,758,000	0	0
合計	72,594,220	0	0	72,594,220	72,594,220	0	0

## 3. 当該年度の執行額内訳

(単位:円)

	金額	備考
物品費	54,718,462	X線回折装置、光学部品、真空部品、実験試薬等
旅費	605,460	研究成果発表旅費(アメリカ国際学会、国内学会)等
謝金・人件費等	0	
その他	512,298	論文印刷費用、学会登録料等
直接経費計	55,836,220	
間接経費計	16,758,000	
合計	72,594,220	

## 4. 当該年度の主な購入物品(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	2011/9/30	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	2012/3/16	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	2012/3/23	東京大学