

記者会見のご案内

「大きなスピン偏極をもった電子材料を開発  
(新しいスピントロニクス材料開発に大きな前進)」

< 会見日時 > 平成 23 年 6 月 17 日 (金) 16 : 00 ~ 17 : 00

< 会見場所 > 工学部 6 号館 1 F 中会議室

< 発表者 > 石坂 香子 (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 准教授)

< 発表内容 >

最先端研究開発支援プログラム (F I R S T) 「強相関量子科学」(中心研究者 ; 十倉好紀) の研究の一環として、東京大学大学院工学系研究科の十倉 好紀教授と石坂 香子准教授らの研究グループは、大きなスピン偏極を有する電子材料を開発し、スピントロニクス材料開発に向けて大きく前進しました。

スピントロニクスデバイス開発分野では電気によって伝導電子のスピン向き (偏極) を制御することは重要な開発課題の一つです。これまでも伝導電子のスピン向きを制御するための素子や材料が盛んに開発されてきましたが、主として結晶表面や界面構造の非対称性を利用したものでした。この為、少ない表面/界面の電子を結晶中の多数の電子と区別して制御する必要があり、応用するうえで技術的にも困難を予感させるものでありました。

今回、結晶構造に極性<sup>(注1)</sup>を持つ半導体 BiTeI (Bi:ビスマス、Te:テルル、I:ヨウ素) の電子構造と磁気構造をスピン・角度分解光電子分光<sup>(注2)</sup>により直接観測することにより、結晶表面の伝導電子に限定されることなく、物質中における多数の伝導電子が、その運動量に依存した大きなスピン偏極を有することを明らかにしました。このような性質は電流や電場によってスピンと磁性を制御する機能を生み出すために大変重要であり、新しいスピントロニクス材料としての応用が期待されます。

本研究は、東京大学大学院工学研究科、理化学研究所基幹研究所、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業、東京大学物性研究所、広島大学大学院理学研究科、広島大学放射光科学研究センター、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所、産業技術総合研究所フレキシブルエレクトロニクス研究センターと共同で行われました。

本研究成果は、平成 23 年 6 月 20 日午前 2 時 (英国時間 6 月 19 日午後 6 時) に英国科学雑誌「Nature Materials」のオンライン速報版で公開されます。

「本研究は、総合科学技術会議が制度設計した最先端研究開発支援プログラム (F I R S T) により日本学術振興会を通して助成されたものです。」

## <背景>

現代社会を支える半導体エレクトロニクスは電子の電荷成分を利用した電気信号を基に形成されています。近年はこれに加えて電子のスピン（磁区、磁化などの磁石としての性質を司る成分）を積極的に利用するスピントロニクスに注目が集まっており、デバイスの省エネルギー化・小型化を進める技術として有望視されています。スピントロニクスデバイスを実現するうえで重要となる「電気と磁気の情報を変換する」機能は主に物質中のスピン軌道相互作用<sup>(注3)</sup>を用いて生み出されます。例えば、通常物質中の自由な電子が持つエネルギーは電子の運動量の2乗に比例しており、スピンには依存しません（図1左）。ところが強いスピン軌道相互作用に加えて非対称な構造（例：結晶の表面や界面構造、結晶構造の非対称性に起因する極性など）を持つ物質中では、電子のエネルギーは運動量とスピンの依存した「ラシュバ分裂」を示します（図1右）。このような物質では電気信号によってスピンを制御することが可能となるため盛んに研究が進められてきましたが、これまで報告されている大きなラシュバ分裂を示すケースは結晶表面における非対称性を利用したものが主であり、結晶内部に同時に存在する大量の通常の電子が応用への妨げとなっていました（図2）。

## <内容>

本研究では、極性半導体 **BiTeI** の単結晶を作成し、スピン・角度分解光電子分光により物質中の電子のエネルギー、運動量、およびスピン成分を直接観測しました。**BiTeI** はビスマス、テルル、ヨウ素の層が順に積み上がった結晶構造（図3a）を有し物質内部で極性を持つとともに、スピン軌道相互作用の大きなビスマスを構成元素に含むため、スピン偏極とそれに伴うエネルギー分裂が期待されます。実際にこの物質で観測された電子のエネルギーは図1右のラシュバ系と同様の大きな分裂を示すことが明らかになりました（図3b）。またスピン成分についてもラシュバ型の運動量依存性を示すスピン偏極が観測されました（図4a-dにおいて赤色がアップ、青色がダウンの偏極成分）。これらの結果はスピン軌道相互作用を考慮した電子構造計算によって良く再現され（図4e,f）、理論的にも支持されています。更に、この物質で得られたラシュバ型分裂の大きさは、これまで様々な表面電子系などで得られた結果と比べても最大級の値となることが分かりました。

## <展望>

本研究で明らかとなった極性半導体 **BiTeI** における大きなラシュバ型分裂は、この物質内部に存在する伝導電子がすべてスピン軌道相互作用によりスピン偏極していることを示しています。このような電子系の実現は、新しいスピントロニクス材料の開発を促進するとともに、内因性スピンホール効果や非自明な超伝導といった新奇な物理現象の発現への道を拓くことが期待されます。

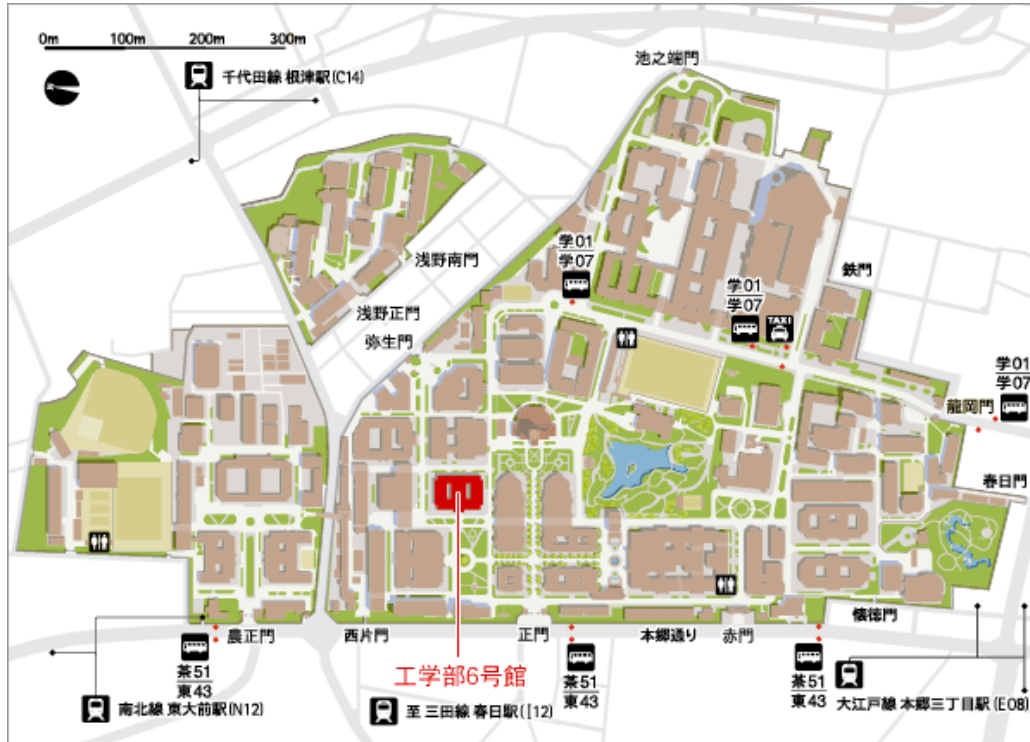
<論文名>

Nature Materials 誌

"Giant Rashba-type spin splitting in bulk BiTeI"

(BiTeI 結晶内部における巨大なラッシュバ型スピン分裂)

<記者会見場所 アクセス> 本郷キャンパス：文京区本郷7-3-1



工学部 6 号館 [http://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam01\\_04\\_07\\_j.html](http://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam01_04_07_j.html)

<参考図>

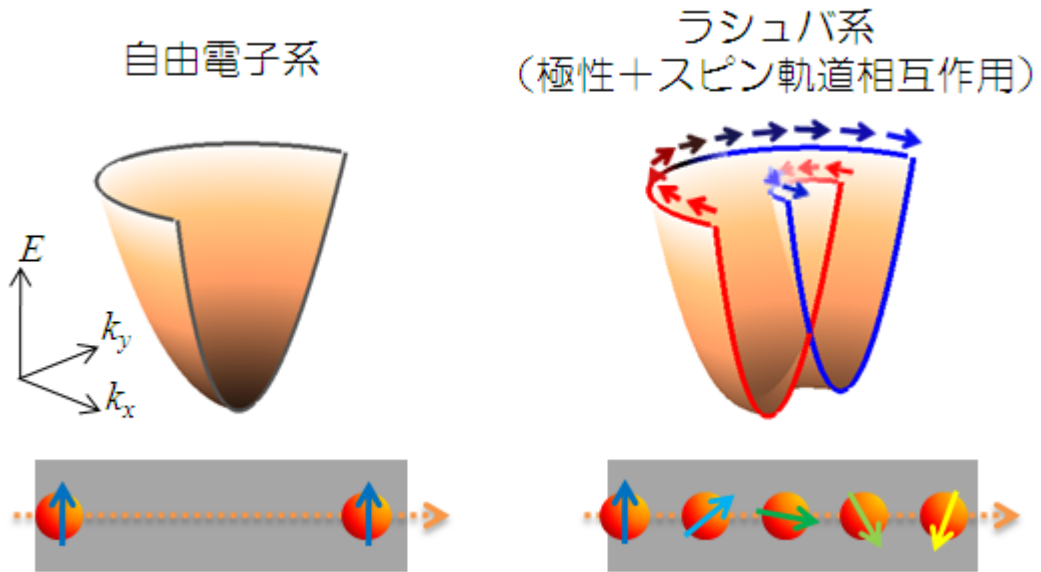


図1： 自由電子系（左）とラッシュバ系（右）の模式図。自由電子系では電子のエネルギー $E$ は運動量 $k_x, k_y$ の二乗に比例した放物面になり、スピンは縮退して区別がつきません。一方ラッシュバ系では放物面が2枚に分裂し、それぞれ運動量に依存したスピン偏極（→、←で示す）を持ちます。このような系で運動する電子はこの偏極に応じて特徴的なスピンの応答を示すため（下）、電流・電場によるスピンの制御が可能になります。

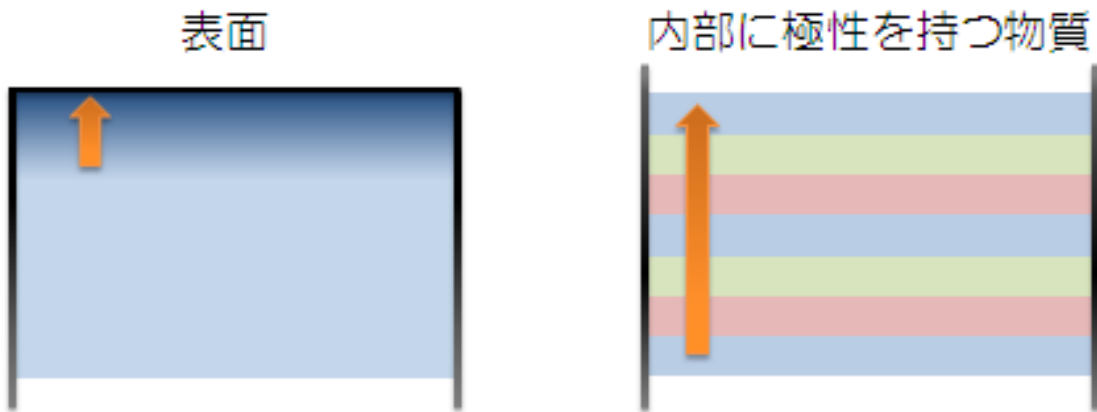


図2： ラッシュバ分裂を引き起こすような非対称構造の例。結晶表面の場合（左）は表面近傍でのみその効果が現れますが、内部に極性を持つ物質（たとえば「・赤・青・緑・赤・青・緑・・・」と無限に積み重なった構造を持つ）の場合（右）、物質内の電子全てにその効果が現れることが期待されます。黄色の矢印は極性ベクトルのイメージです。

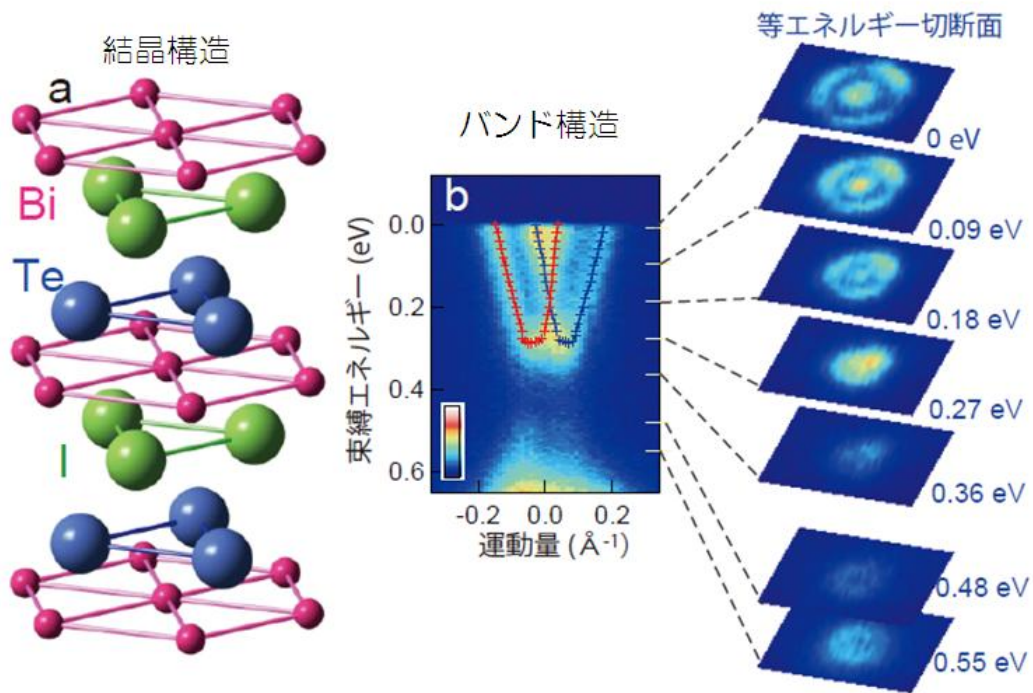


図3： 極性半導体 BiTeI の結晶構造(a)および角度分解光電子分光により観測された電子のエネルギーと運動量の分散関係(b)。 (b)の結果から、図1右に示した「ラシュバ系」とよく類似した分裂構造を持つ様子が分ります。

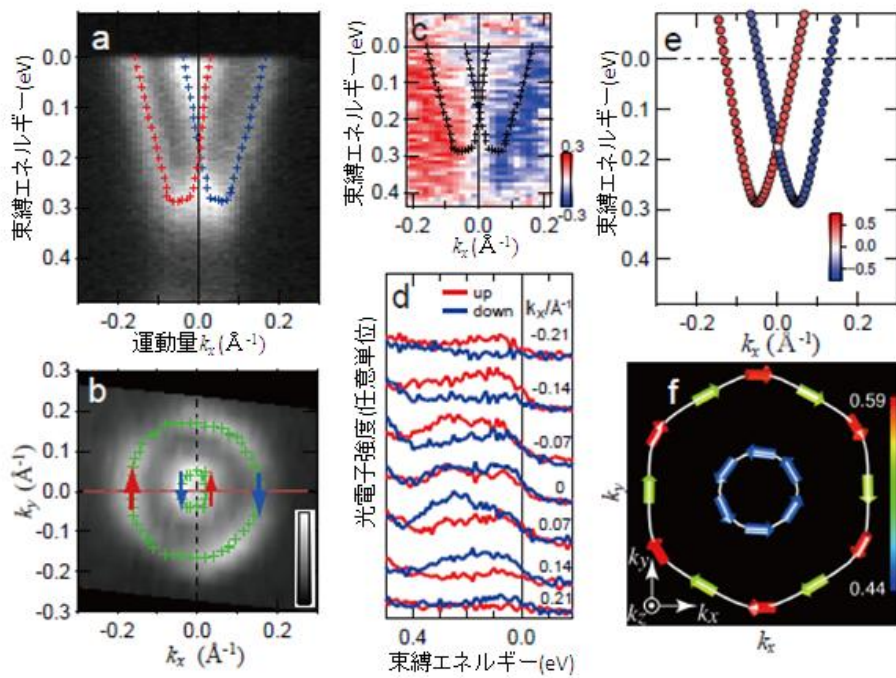


図4： 角度分解光電子分光で観測された電子のエネルギー/運動量の関係(a)と、あるエネ

ルギーにおける2次元運動量  $k_x, k_y$  面(b)、スピン分解光電子分光により得られたスピン成分(c,d)、および電子構造計算により得られた再現結果(e,f)。図(a-e)中の赤色・青色表示や(b,f)の矢印はスピンの方向(アップ、ダウン)を表わしています。(a)と(e)、および(b)と(f)を比較すると、実験結果が計算により良く再現されていることが分ります。

#### <用語解説>

##### (注1) 極性

本研究において、極性とは非対称な原子配置によりある方向に生じる電氣的偏りを指しています。BiTeIでは特に「---Bi-Te-I-Bi-Te-I---」という順で積層することにより、結晶内部において積層方向に存在する極性構造が特徴的です。

##### (注2) スピン・角度分解光電子分光

スピン・角度分解光電子分光とは、物質に仕事関数以上のエネルギーを持つ光を照射し、外部光電効果により放出された光電子のエネルギー、放出角度、およびスピン成分を分析する手法です。これにより、物質内部に存在する電子のエネルギー、運動量、およびスピンという全ての情報を直接知ることができます。

##### (注3) スピン軌道相互作用

スピンは電子の持つ内部自由度のひとつであり、アップ↑とダウン↓という二つの状態を取ります。スピンは磁場に対して平行になるとエネルギー利得が生じる性質を持ち、物質の磁性の源となっています。ここで、電子が原子核の周りを円軌道で運動する場合は考えると、相対的な原子核の軌道電流の作る磁場の効果により電子スピンは影響を受けます。この効果をスピン軌道相互作用と呼び、原子番号の大きな重い原子核ほど大きな作用を生じることが知られています。

#### <本研究に関する問い合わせ先>

石坂 香子 (いしざか きょうこ)

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 准教授

TEL: 03-5841-6849

E-mail: [ishizaka@ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:ishizaka@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

#### <「最先端研究開発支援プログラム」に関する問い合わせ先>

独立行政法人日本学術振興会

研究事業部 最先端研究助成係

TEL: 03-3263-1698

E-mail: [first@jsps.go.jp](mailto:first@jsps.go.jp)

URL: <http://www.jsps.go.jp/j-first/index.html> (JSPS 最先端研究開発支援プログラム)

<「強相関量子科学」支援全般に関する問い合わせ先>

平林 泉 (ひらばやし いずみ)

理化学研究所基幹研究所 強相関量子科学研究グループ (CERG)

副グループディレクター

兼 強相関研究支援チーム チームリーダー

TEL: 048-462-4660 (内線 6003)

E-mail: [hiraizumi@riken.jp](mailto:hiraizumi@riken.jp)

URL: <http://www.riken.jp/cerg/index.html>