

## AI 時代を支える新磁性体、二酸化ルテニウム薄膜の「交代磁性」を実証

～AI・データセンター向け高速・高密度メモリ開発に期待～

NIMS は東京大学、京都工芸繊維大学、東北大学と共同で、二酸化ルテニウム ( $\text{RuO}_2$ ) 薄膜が第三の磁性体である交代磁性を示すことを実証しました。「第三の磁性体」は、強磁性体を用いたメモリの問題点を解決し得るものであり、高速・高密度な次世代メモリ素子として応用が期待されています。本研究により、 $\text{RuO}_2$  がその有力候補であることに加え、結晶配向制御による機能向上の可能性も示されました。研究成果は 2025 年 9 月 24 日付で『Nature Communications』に掲載されました。

### 研究成果の概要

#### ■ 従来の課題

二酸化ルテニウム ( $\text{RuO}_2$ ) は、「第三の磁性」である交代磁性<sup>(1)</sup>を示す有力候補として注目されてきました。従来の強磁性体は外部磁場で容易に書き込める一方、漏れ磁場による記録エラーが高密度化の壁でした。反強磁性体は漏れ磁場などの外乱に強いものの、スピン（原子レベルの N 極－S 極）が打ち消し合うため電気的な読み出しが難しいという課題があります。そこで、外乱に強く、しかも電気的に読み取り－将来的には書き換えまで狙える－という“いいとこ取り”の磁性体が求められてきました。しかし  $\text{RuO}_2$  の交代磁性をめぐっては世界的に実験結果が一致しないことから本質解明が進まず、さらに均一な結晶配向をもつ薄膜試料が十分に得られていなかったため、決定的な実証に至っていませんでした。

#### ■ 成果のポイント

NIMS・東京大学・京都工芸繊維大学・東北大学の共同研究チームは、サファイア基板上に結晶の向きをそろえた単一配向（単一バリエーション） $\text{RuO}_2$  薄膜を作製し、基板選択と成長条件の最適化によって配向が決まる仕組みを明らかにしました。X 線磁気線二色性で全体の磁化（N 極－S 極）が打ち消される磁気秩序とスピン配列の向きを特定し、さらにスピンの向きで電気抵抗が変わる現象（スピン分裂磁気抵抗）を観測して、スピン向きによる電子状態の違いを電気的に確認しました。これらの結果は第一原理計算とも整合し、総合して  $\text{RuO}_2$  薄膜が交代磁性体であることを実証しました〔図 1〕。本成果は、 $\text{RuO}_2$  薄膜が高速・高密度な次世代メモリ材料として有望であることを強く裏付ける成果となりました。

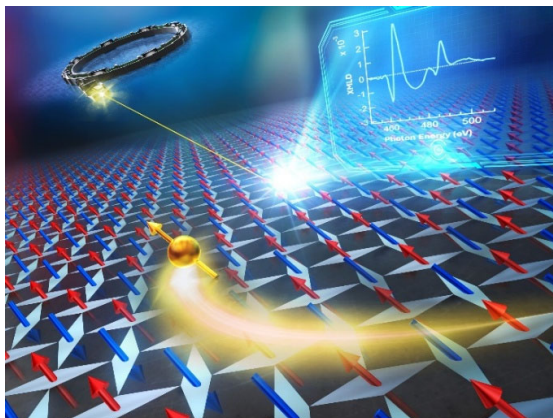


図 1：X 線磁気線二色性とスピンの向きで示した単一配向  $\text{RuO}_2$  薄膜の交代磁性の概念図。

## ■将来展望

今後、この成果を基盤として、RuO<sub>2</sub>薄膜を利用した高速・高密度の次世代磁気メモリの実現を目指します。交代磁性の高速・高密度という特長を活かすことで、省エネルギー型情報処理への貢献が期待されます。また、本研究で確立した放射光を用いた磁性解析技術は、他の交代磁性材料の探索やスピントロニクス素子の開発にも応用可能です。

## ■その他

- 本研究は、NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センター スピントロニクスグループの温 振超（ウェン ジェンチャオ）主任研究員、Cong He（ツォン ハ）ポスドク研究員（研究当時）、介川 裕章グループリーダー、三谷 誠司上席研究員、磁性・スピントロニクス材料研究センターの大久保 忠勝副センター長、東京大学大学院理学系研究科の岡林 潤准教授、京都工芸繊維大学 三浦 良雄教授、および東北大学 関 剛斎教授らで構成される研究チームによって実施されました。
- 本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（22H04966、24H00408）、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業（JPJ011438）、東北大学金属材料研究所のGIMRTプログラム、東北大学電気通信研究所の共同研究プロジェクトの支援を受けています。
- 本研究成果は、2025 年 9 月 24 日に国際科学誌『Nature Communications』のオンライン版に掲載されました。

## 研究の背景

近年、人工知能（AI）やビッグデータの活用が進み、社会で扱う情報量は飛躍的に増加しています。その結果、情報処理に伴うエネルギー消費も急増し、省エネルギー型の次世代メモリ開発が重要な課題となっています。磁性材料は、電氣的に情報を扱う「スピントロニクス」<sup>(2)</sup>の中心分野として注目されてきました。強磁性体は実用化が進んでいますが、漏れ磁場のため高密度化には限界があります。一方、反強磁性体は漏れ磁場などの外乱に強いものの、情報読み取り効率が低いという課題がありました。

この背景から、第三の磁性体として交代磁性体が注目されています。交代磁性体は、スピンの結晶構造に応じて交互に並び、全体として磁化は打ち消し合う一方で、電子構造がスピンの向きによって分かれるという特異な性質を示します。これにより、メモリセル間の干渉がなく、電氣的情報書き込み及び読出しが可能という、高集積度の次世代メモリ材料として期待されています。

図 2 は強磁性体・反強磁性体・交代磁性体の違いを示した模式図であり、実空間でのスピン（上段）と運動量空間での電子構造の模式図（下段）を比較しています。交代磁性体は外乱に強く、電流にスピンの偏りを生み出せるという特長があります。

その候補の一つが二酸化ルテニウム（RuO<sub>2</sub>）です（図 3）。RuO<sub>2</sub>は優れた導電性を持ち、理論的に交代磁性を示すと予想されてきました。しかし、磁気モーメントの有無については世界的にも研究結果が一致せず、国際的な議論が続いていました。さらに、応用に不可欠な結晶配向のそろった薄膜試料も十分に得られておらず、その磁性の本質は未解明のままでした。

このため、RuO<sub>2</sub>が交代磁性を示すことを実証し、結晶配向が決まる仕組みを明らかにすることは、磁性研究の新領域を切り拓く学術的意義と、AI・データ社会における省エネルギー化に貢献する社会的意義の双方を持つと期待されます。

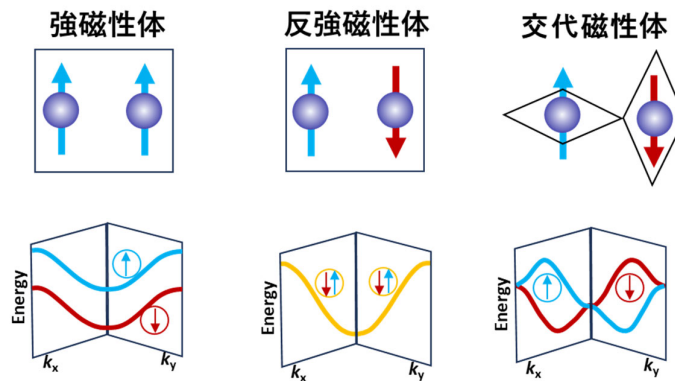


図 2 強磁性体、反強磁性体、交代磁性体のスピ配置（上段）と電子構造の模式図（下段）。交代磁性は反強磁性と同様にマクロ磁化を持たず外乱に強い一方、スピンの向きによって電子状態が分かれており、スピンの向きによって電子の流れを生み出すことができる。

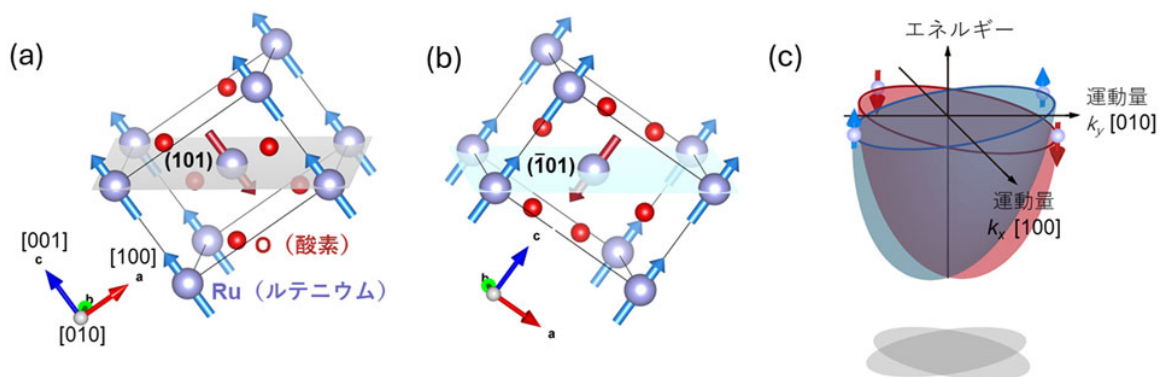


図 3 二酸化ルテニウム ( $\text{RuO}_2$ ) 薄膜のスピ配置の模式図。(a) (101)配向を持つタイプ（バリエーション A）。(b)  $(\bar{1}01)$  配向を持つタイプ（バリエーション B）。(c)  $\text{RuO}_2$ におけるスピンの向きによって分かれる電子状態（フェルミ面）。青と赤はそれぞれスピンの異なる状態を表す。

## 研究内容と成果

NIMS、東京大学、京都工芸繊維大学、東北大学からなる共同研究チームは、二酸化ルテニウム ( $\text{RuO}_2$ ) 薄膜が新しいタイプの磁性体「交代磁性体」であることを実証しました。これまで、 $\text{RuO}_2$ は理論的に交代磁性を持つ可能性が指摘されていましたが、実験的な証拠は乏しく、Ru 原子が実際に磁気モーメントを持つかどうかについて国際的に論争が続いていました。特に  $\text{RuO}_2$ では、薄膜内に複数の面内結晶配向（バリエーション<sup>(3)</sup>）が混在するため、反平行に並んだスピンの向き（ネールベクトル<sup>(4)</sup>）やスピンの流れを正確に把握することが難しく、単一バリエーション  $\text{RuO}_2$ 薄膜による交代磁性の直接実証はこれまで達成されていませんでした。

研究チームはまず、サファイア製の基板を使って高品質な  $\text{RuO}_2$ 薄膜を作製し、単一バリエーション  $\text{RuO}_2$ 薄膜を初めて実現しました。基板の選択と成長条件を精密に制御することで、これまで不明だった  $\text{RuO}_2$ の結晶配向メカニズムを解明しました。図 4 (a)に示すように、X 線回折 (XRD)<sup>(5)</sup> 測定により単一バリエーションのみが存在することを確認しました。さらに、走査透過電子顕微鏡 (STEM)<sup>(6)</sup> 観察により、原子スケールでの界面構造を解析しました (図 4(b))。その結果、 $\text{RuO}_2$ とサファイア基板の酸素原子配列が精密に整合することが、単一バリエーションを安定化させる鍵であることを見出しました。また、第一原理計算<sup>(7)</sup>によっても、 $\text{RuO}_2(101)$ バリエーションの形成エネルギーが低く、安定化することが確認され、実験結果を強く裏付けました。

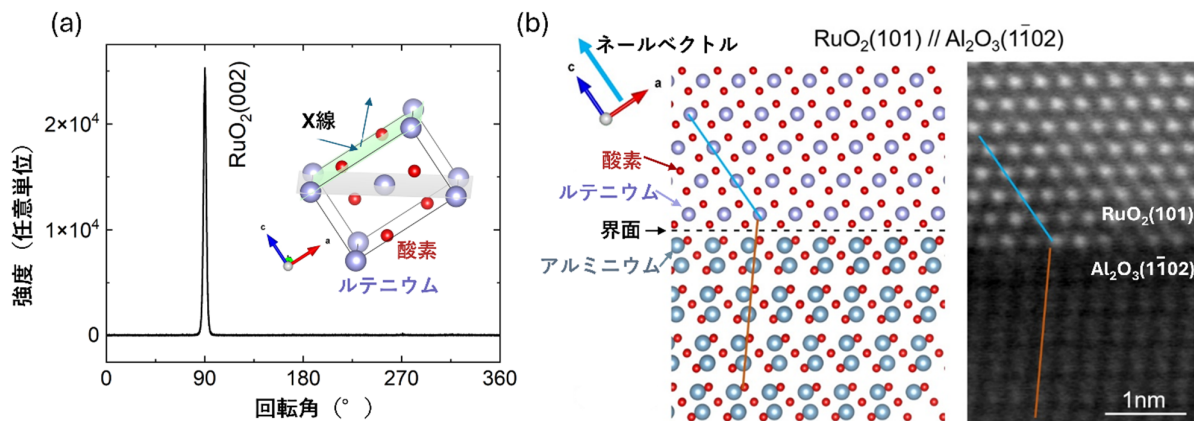


図4 RuO<sub>2</sub>単一バリエーション薄膜の構造解析。(a) X線回折による測定結果。ピークが1つだけ現れ、結晶配向がそろっていることを確認。(b) サファイア基板上に成長したRuO<sub>2</sub>薄膜の断面構造。原子レベルの観察により、RuO<sub>2</sub>薄膜と基板の原子配列が精密に一致していることを確認。水色矢印はスピンの並び（ネールベクトル）の方向を示す。

続いて、高エネルギー加速器研究機構フロンティアファクトリーのビームライン BL-16A にて、放射光を用いて X 線磁気線二色性 (XMLD) <sup>(8)</sup> 測定を行いました。この手法は、スピン（原子レベルでの N 極 - S 極の向き）が互いに打ち消し合った状態でも検出できるため、反強磁性や交代磁性といった特殊な磁性を調べるのに適しています。本研究では、この測定を試料の向きを少しずつ変えながら行うことで、RuO<sub>2</sub>薄膜内でスピンの並びがネールベクトルの向きを明らかにしました（図5 (a-c)）。さらに、温度を上げながら測定した結果、約 390 K（約 117℃）を超えると磁気秩序が消え、XMLD 信号も消失することがわかりました。これにより、得られた信号が Ru 原子自体の磁気由来であることを確認しました。これらの結果から、RuO<sub>2</sub>薄膜が交代磁性を持つことを直接示す強い証拠が得られました。さらに、第一原理計算による解析から、Ru の周囲でスピン分布がわずかに歪むことが、スピンの向きが特定の方向にそろいやすくなる原因であることを突き止めました。これは実験で観測された結果とも一致しており、RuO<sub>2</sub>における交代磁性が生じる仕組みを理論的にも裏付ける成果となりました。

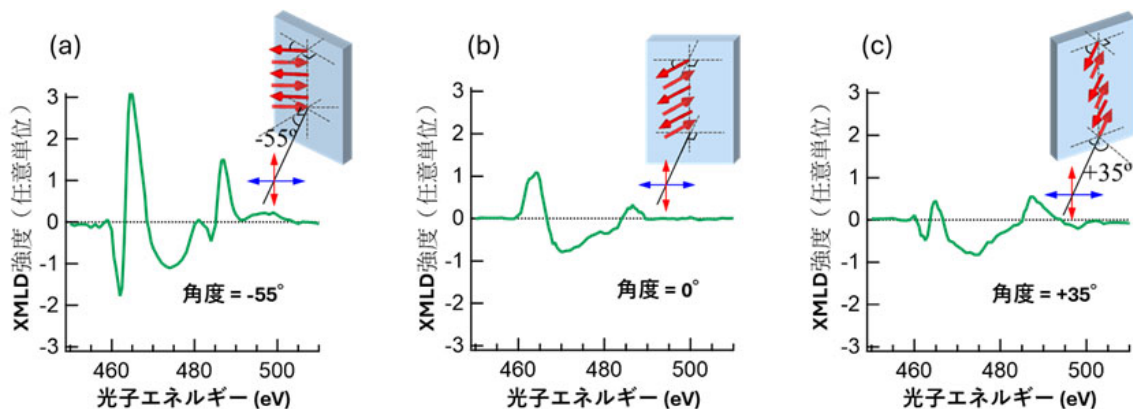


図5 RuO<sub>2</sub>薄膜の角度依存 XMLD 測定結果。試料を回転させたときの測定角度を(a)−55°、(b)0°、(c)+35°とした場合の XMLD スペクトルを示す。信号の強さ（振幅）が角度に応じて系統的に変化しており、スピンの反対方向に並ぶ配列（ネールベクトル）の向きを示している。赤矢印はRuO<sub>2</sub>中のネールベクトルの方向を表す。縦軸のスケールはすべてのパネルで統一しており、測定はすべて 80 K（−193℃）で実施した。

さらに、RuO<sub>2</sub>の上に強磁性体である Co-Fe-B <sup>(9)</sup> 層を積層した構造（ヘテロ構造）<sup>(10)</sup> を作製し、電流の流れやすさ（磁気伝導特性）を調べました。その結果、電子のスピンが偏った状態で流れることによって生じる磁気抵抗効果 <sup>(11)</sup> を初めて検出しました（図6）。この現象はスピン分裂磁気抵抗（SSMR）と呼ばれ、単一バリエーション交代磁性薄膜に特有のスピン輸送現象です。この成果は、次世代スピントロニクス素子設計の上で不可欠な知見となります。



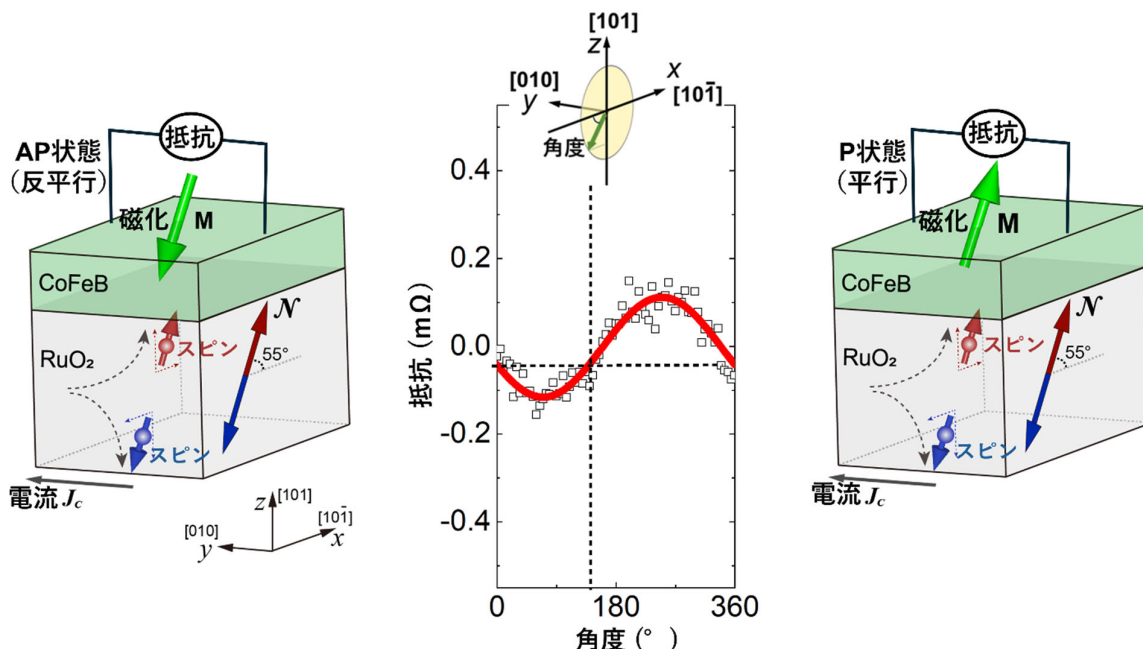


図6 RuO<sub>2</sub>/Co-Fe-B 二層膜におけるスピン分裂磁気抵抗 (SSMR)。RuO<sub>2</sub>(101)薄膜に[010]へ電流を流すと、スピン分裂効果によって傾斜スピン流<sup>(12)</sup>が発生する。Co-Fe-B 層の磁化  $M$  を(010)内で回転させたときの抵抗変化を角度依存性として示している。磁化  $M$  と RuO<sub>2</sub>を伝導するスピンモーメント  $s$  が平行 (P 状態) / 反平行 (AP 状態) になる角度で、それぞれ低抵抗と高抵抗を示すことから、傾斜スピン流の存在が確認された。赤線は理論式によるフィッティング結果。

本研究により、RuO<sub>2</sub>(101)単一バリエーション薄膜を実現し、交代磁性を直接実証しました。今回明らかになったスピントロニクス効果を通じて、RuO<sub>2</sub>が次世代の省エネルギーデバイスの有力候補であることを示しました。

## 今後の展開

今回の研究により、RuO<sub>2</sub>薄膜が「第三の磁性体」と呼ばれる交代磁性を示すことが実証されました。これは、高速・高密度の効率的な情報書き込みを可能にする特性であり、次世代メモリの開発につながる重要な成果です。今後は、データセンターや AI 処理など膨大な電力を消費する分野での活用が期待され、省エネルギー社会の実現に大きく貢献できる可能性があります。

さらに、今回確立した薄膜作製や計測技術は、他の新素材の探索や新たなスピントロニクス素子の開発にも応用可能です。これにより、私たちの生活を支える情報機器の小型化・高性能化を促進し、持続可能な情報社会の構築にも寄与することが期待されます。

## ■掲載論文

|     |                                                                                                                                                |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目  | Evidence for single variant in altermagnetic RuO <sub>2</sub> (101) thin films                                                                 |
| 著者  | Cong He, Zhenchao Wen*, Jun Okabayashi*, Yoshio Miura*, Tianyi Ma, Tadakatsu Ohkubo, Takeshi Seki, Hiroaki Sukegawa, and Seiji Mitani<br>*責任著者 |
| 雑誌  | Nature Communications                                                                                                                          |
| DOI | 10.1038/s41467-025-63344-y                                                                                                                     |
| 掲載日 | 2025 年 9 月 24 日                                                                                                                                |

## ■用語解説

### (1) 交代磁性

スピンの結晶構造に応じて交互に配列し、全体としては磁化を打ち消し合う一方で、電子構造がスピンの向きによって分かれる特異な磁性（図2）。外部磁場がなくても自発磁化を示す強磁性や、隣接スピンの反平行に並び磁化が相殺される反強磁性に続く「第三の磁性体」として注目されており、微細化で問題となる漏洩磁場がなく、電流によって高速に情報を書き込めるため、省エネルギー型メモリへの応用が期待されている。

### (2) スピントロニクス

電子の電荷だけでなく「スピン（磁気的な性質）」も利用して情報を扱う学術分野。用途によっては、従来の半導体素子に比べて省エネルギーで高速な情報処理が可能とされ、次世代の情報デバイス開発に欠かせない。

### (3) バリアント

結晶で用いられる用語で、同一の化学組成を持ちながら、結晶軸の向きなどが異なる領域を指す。

### (4) ネールベクトル

反強磁性体や交代磁性体において、互いに反対向きに並んだスピンの方向を表すベクトル。材料内のスピン構造を理解する上で重要な指標となる。

### (5) X線回折（XRD）

結晶にX線を当てたときの回折パターンを調べることで、原子がどのように並んでいるかを解析する手法。結晶構造や配向の確認に広く利用される。

### (6) 走査透過電子顕微鏡（STEM）

試料に電子を透過させて原子レベルの構造を観察する顕微鏡。界面や結晶構造を高い分解能で直接観察できる。

### (7) 第一原理計算

物質の性質を、実験データに頼らず基本的な物理法則のみを出発点として計算する手法。特に物質の電子物性や磁性の理解に用いることで、実験結果の裏付けや予測に役立つ。

### (8) X線磁気線二色性（XMLD）

放射光の縦方向、横方向の直線偏光X線を用いて磁気的な性質を調べる方法。特に、磁化が打ち消し合って全体として磁化を持たない反強磁性や交代磁性を検出するのに有効。

### (9) Co-Fe-B（コバルト・鉄・ホウ素合金）

コバルト（Co）、鉄（Fe）、ホウ素（B）を成分とする強磁性材料。磁気メモリやハードディスクの読み取りヘッドなどに広く利用される。

### (10) ヘテロ構造

異なる材料を積層して構成される構造。

界面で新しい機能や特性が現れるため、電子デバイスやスピントロニクス研究で広く利用される。

### (11) 磁気抵抗効果

外部磁場やスピン構造の変化によって電気抵抗が変化する現象。磁気センサーやハードディスクの読み取りヘッドなどに応用されている。

### (12) スピン流

電子の持つスピン（磁気的性質）の偏りが流れる現象。電荷の流れである通常の電流とは異なり、スピン情報を運ぶことができ、次世代情報処理技術の基盤となる。