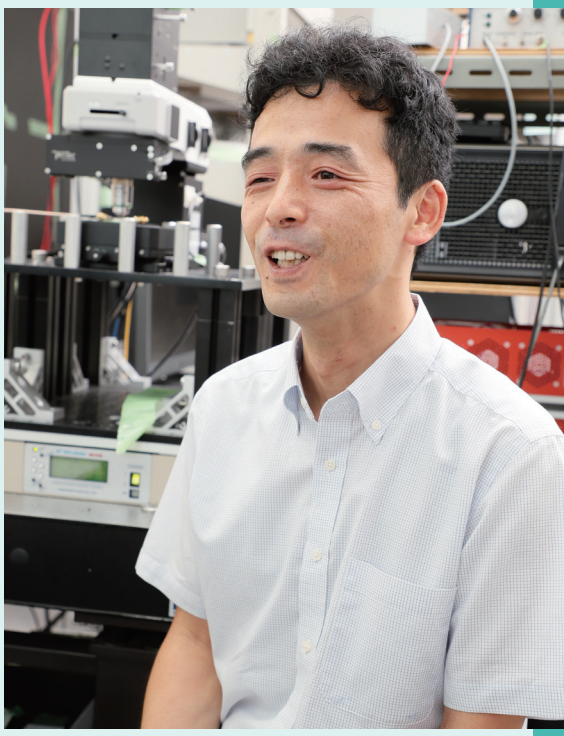
特集 3

スピンダイナミクスによる現象を探究、制御し応用へつなげる

応用物理学領域
安 東秀 准教授



スピンとは電子の角運動量を表す内部自由度の一つであり、磁石の磁場はスピンによって発生する。

スピンと電荷を利用するスピントロニクスは新たな領域と目され、メモリ、デバイス、センサーなどの研究が盛んに行われている。例えば情報素子では、従来は「0か1か」に情報が保持されるが、スピンを用いた量子ビットではこれに加え、「0でも1でもある」状態も任意の割合で取ることが可能で、情報処理の飛躍的な向上が期待される。これは、電子スピンには「上向き」「下向き」という2つの状態があり、さらに両方の状態である「重ね合わせ状態」という量子力学的な性質に依るものである。

スピンの量子力学的性質を応用する

私たちは、スピンのダイナミクス（歳差運動＝自転する物体の回転軸が円を描いて振れる動き）による現象を探索・応用し、新規のデバイスやセンサーの開発を目指しています。スピンによる量子力学的原理を駆使すれば、情報処理の高速化のみならず、ジュール熱によるエネルギー損失も回避が可能となります。主要なテーマは2つ、スピン波を利用した情報伝送、ダイヤモンドスピンによるスピンの観測です。

（1）スピン波による情報伝送

スピン波とは、個々のスピンの磁気共鳴による歳差運動が波となって伝播する現象です。これまでの電子スピン情報素子では、2つの素子間の相互作用を大きくするため、その距離をナノメートル程度にする必要がありました。もとよりスピンには、熱などの外的因子によりその向き（量子情報）が変わってしまうという制御の困難さもあります。

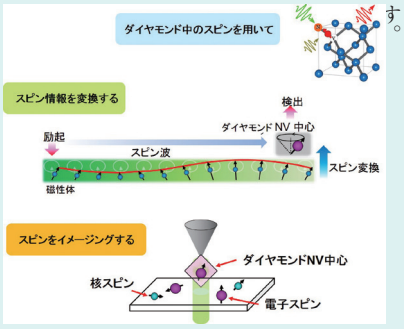
私たちの最近の研究では、スピン波とダイヤモンド中の窒素－空孔複合体中心（NV中心）とを組み合わせた長距離（約3．6㎜）のスピン信号変換に成功しています。このダイヤモンドNV中心とは、ダイヤモンド中に存在する窒素不純物と空孔が対になった構造で、室温・大気中においてスピン状態が安定的に存在します。これまでに、スピン1個を捉えたり、操作や検出したりする試みはありましたが、それらは極低温あるいは超高真空などの特殊な環境を要するものでした。

（2）ダイヤモンドスピンによるスピンの観測

このダイヤモンドNV中心電子スピンは、電子スピンや核スピンを計測できるスピンプローブとしても期待されています。NV中心の単一スピン状態を観測するには光を利用します。NV中心にある不対電子は、磁気量子数 $m_s=-1,0,+1$ のスピン3重項状態を形成しています。レーザーの光励起によるエネルギー状態の遷移に由来する蛍光を検出しながら、発光の基底状態にある電子スピンをマイクロ波で磁気共鳴励起することにより、発光強度の変化から単一電子スピンの磁気共鳴信号を検出できます。ここで着目すべきは、1個の電子スピン状態を室温・大気中で観測できることです。これは、スピン状態を $m_s=0$ に初期化できること、マイクロ波によりスピンの存在確率を $m_s=\pm1$ または -1 へ大きく変化させられることがその要因です。

このNV中心の単一スピンは周囲の漏洩磁場に応じて磁気共鳴周波数が変化することから、周囲に存在するスピンを検出することもできます。こうしたセンサーの原理を利用し、NV中心を持つナノダイヤモンド粒子を走査プローブの探針に取り付け、試料の表面を走査することで、1個の電子スピンや核スピンをイメージングすることも可能です。

こうしたスピンセンサーを、たとえば医療の磁気共鳴画像（MRI）に応用すれば、タンパク質や生体分子などを原子レベルで測定できる可能性も生まれます。



安 東秀

An Toshu

早稲田大学修士（理学）、豊田工業大学博士（工学）。日本学術振興会特別研究員 PD（豊田工業大学）、科学技術振興機構 PD 研究員、東京大学 PD 研究員、科学技術振興機構さきがけ専任研究員、東北大学助教、理化学研究所研究員を経て本学着任。専門はスピンダイナミクス。