

8223036 栗山淳

デバイス材料工学

第4回課題

1988年にフランスの研究チームによって発表されたこの研究論文は、鉄(Fe)とクロム(Cr)という2種類の金属を極めて薄い層で交互に積み重ねた超格子構造において、外部から磁場を加えることにより、電気の流れやすさ(電気抵抗)が劇的に変化する現象、すなわち「巨大磁気抵抗効果(GMR)」を初めて実験的に観測したものであり、その後のエレクトロニクス技術や情報記録装置に大きな影響を与える重要な発見となった。このGMR現象は、従来の材料では見られなかった非常に大きな電気抵抗の変化を示し、例えば4.2ケルビンという低温環境でCr層の厚さが9オングストローム(1オングストロームは10億分の1メートル)のときに、外部磁場を2テスラまで加えると電気抵抗が約半分にまで下がるという結果が得られた。これは、磁場が材料内部の電子の流れを大きく制御できるということを示しており、後のハードディスクの読み取りヘッドや高感度磁気センサーの開発に直結する基礎研究である。

この研究で使われた材料は「(001)Fe/(001)Cr超格子」と呼ばれ、鉄とクロムの単結晶層をナノメートルスケールで交互に積層した構造をしている。この超格子は分子線エビタキシー(MBE)という極めて高精度な薄膜成長法を用いて、ガリウムヒ素(GaAs)基板の上に成長された。成膜中の真空度は非常に高く( $5 \times 10^{-10}$ Torr)、基板温度は約20°Cに保たれた。成長中にはオージェ電子分光や反射高速電子回折、X線回折、透過型電子顕微鏡などを用いて、Fe層とCr層が互いに混ざり合わず、綺麗な界面を保っていることが確認された。これにより、電子が材料中を通過する際の「スピン依存伝導」が明瞭に観測される構造が実現した。

Fe層は磁石の性質を持ち、一方Cr層は非磁性であるが、Cr層が30オングストローム以下になると、隣り合うFe層の磁化が反対向きに揃う「反強磁性結合」が現れる。このとき、Fe層の磁化(小さな磁石のような性質)は交互に上下逆になり、全体の磁化は打ち消し合ってゼロに近くなる。このような反強磁性的配置のとき、電子がスムーズに流れることができず、結果として電気抵抗が高くなる。一方、外部から磁場を加えることでFe層の磁化が同じ向きに整列すると、スピンドاون電子(電子の持つ小さな磁石の向きが下向きのもの)が主に伝導に関わるようになり、電子の流れが妨げられなくなるため、電気抵抗が大きく下がる。これがGMRの基本的なメカニズムである。

実験では、磁場を平面内に加えた場合と垂直方向に加えた場合で電気抵抗の変化を比較しており、磁場の向きによっても抵抗の下がり方に違いが見られた。これは、材料内部の磁気

異方性やスピンの整列方向によって電子の散乱のされ方が異なるためである。また、Cr 層の厚みが増えると、Fe 層間の磁気結合が弱くなり、磁場を加えても Fe 層の磁化が揃いにくくなる。その結果、GMR 効果も弱くなる傾向が見られた。同様に、温度が上昇すると電子の熱運動が激しくなり、スピンの乱れやすくなるため、GMR 効果も減少するが、室温でも明確な抵抗変化が観測されており、実用性の可能性が示唆された。

この GMR 効果は、電子のスピンという量子力学的な性質に依存しており、「スピン依存散乱」や「スピンチャネル選択的伝導」といった考え方によって説明される。電子が Fe 層の中を移動するとき、スピンの揃っていない層にぶつかると強く散乱されてしまう。このため、Fe 層の磁化が揃っているときにはスピンドアウ電子が主に電流を運び、電気抵抗が下がるが、磁化が反対向きのまま電子の進行方向が乱され、抵抗が上がる。このスピンの状態の違いが、電気の流れやすさに大きな影響を与えている。

本研究は、このようなスピン依存伝導の実験的証拠を初めて示したものであり、その物理的な意味だけでなく、実用技術への応用可能性という点でも極めて高く評価される。その後の研究では、この GMR 効果を利用した「磁気ヘッド」や「磁気センサー」が開発され、ハードディスクの読み取り精度や記録密度の向上に大きく貢献した。また、この発見は「スピントロニクス」と呼ばれる新しい分野を切り開く契機となり、2007 年には本研究の中心的な貢献者である Albert Fert（本論文の筆頭著者の一人）と Peter Grünberg がノーベル物理学賞を受賞することになった。

このように、鉄とクロムの超薄層を積層したシンプルな構造から生まれた巨大磁気抵抗効果は、物理学と工学の両面で非常に大きなインパクトを与え、今日の情報社会を支える基盤技術の一つとなっている。この研究は、「スピンという見えない性質が、電子の動きにどれほど大きな影響を与えるのか」を初めて具体的に示したものであり、ナノテクノロジーと量子力学を応用した新しい材料設計の可能性を切り開いたと言える。