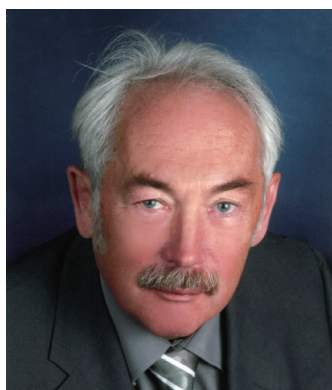




2007年(第23回)

# 日本国際賞 受賞記念講演会

平成19年4月18日(水)13:00～16:00  
経団連会館



ペーター・グリュンベルク 博士（ドイツ）

ドイツ・ユーリヒ固体物理研究所

1939年生れ

授賞業績：

巨大磁気抵抗効果（GMR）の発見と

革新的スピンエレクトロニクス・デバイスの創生

## 磁性体積層構造におけるスピン輸送現象

磁性材料、とりわけ磁性体薄膜は、ハードディスク・ドライブが1950年代に初めて導入されて以来、近年の大量データストレージ、さらには、ITの根幹を成してきました。薄膜磁性の分野における広範な研究を通じて複雑な層状磁性系の物性についての理解が深まり、その基礎の上に立って過去数十年の間に磁気データストレージの容量は飛躍的に増大しました。この20年間にはパラダイムの転換も起こりました。薄膜の磁性に関する当初の研究は主に材料の磁性に重点を置くものでしたが、この20年にわたって年々スピン輸送効果に関心の中心が移ってきました。それは、マイクロエレクトロニクスに直結するものであり、電荷とスピンの両方の輸送現象を活用する新しい研究分野、スピントロニクスの出現に至ったのです。1986年の層間交換結合（IEC）の発見と、それに続く2年後の巨大磁気抵抗効果（GMR）の発見を引き金に、IECやGMRと同様、非強磁性スペーサーを挟んだ2枚の強磁性薄膜間における電子スピンの輸送を基盤とする現象に関して、さまざまな実験が相次いで行われました。

これから論ずる基本構造もよく似たものです。非磁性の中間層Bを、磁化M1とM2をもつ2枚の強磁性膜AとCで挟んだ三層膜です。薄膜AとCは一般に金属としますが、Bは金属、半導体、絶縁体のいずれでも構いません。AからCへの電子の遷移の際に、弾性または非弾性電子散乱、反射、トンネリングなどのさまざまな微視的な過程が起こります。それらの過程はスピン依存性を持ちます。すなわち、量子化軸の役割をする局所的な磁化に対して個々の電子スピンのどの方向を向いているかに依存するのです。

中間層の材料の電子的性質に応じ、上に述べたような電荷やスピン輸送の微視的な過程が作用して、さまざまな現象が観察されます。中間層が金属の構造では、大半の場合、振動的なIECが観察されますが、これは主にスピン依存界面反射率と多重干渉によるものです。金属のみで構成される三層構造におけるスピン依存散乱は、巨大磁気抵抗効果（GMR）をもたらす主要なメカニズムです。しかしながら、スピン依存散乱の概念をさらに推し進めると、さらに極めて興味深いことに行き着きます。

界面に垂直な方向に流れる電流によってスピンモーメントが1つの強磁性層（固定層；磁化  $M_{\text{fixed}}$ ）からもうひとつの強磁性層（自由層；磁化  $M_{\text{free}}$ ）へ輸送されることにより、自由層の磁化  $M_{\text{free}}$  にトルクが生じます。電流密度が十分高ければ、スピン輸送トルクは電極の磁化に大きな影響を及ぼすに十分な大きさになるでしょう。この結果スピン輸送トルクによってマイクロ波帯の磁気励起が生成することがありますが、これは電流駆動で起きた磁化反転の動的過程として生じるものです。低磁界においては、電流誘起磁化反転（CIMS）が観測されます。CIMS では、スピン輸送トルクによって自由層の磁化  $M_{\text{free}}$  が電流の極性に依って固定層の磁化  $M_{\text{fixed}}$  方向と平行または反平行に配向します。

一方、中間層が絶縁体や半導体の場合状況は異なります。絶縁層内に浸みだした電子状態がエバネセント状態であり、絶縁障壁を越えてスピン依存トンネリングが起きるため、大半の場合振動しないIECが観察され、概略図に示すようなトンネル磁気抵抗（TMR）効果を生み出します。最近では絶縁体の中間層でも、CIMSが観測されています。

上記の現象は、理論的には、伝導電子が磁性層 A から中間層 B を経て磁性層 C へスピンに依存する透過と界面反射をうけることに基づいて説明されます。この描像は概念的には単純ですが、A、B、C 層の材料パラメータに基づいてこの効果の信頼性のある予測をすることは、ときにはうまくいく場合があるとしても、一般的には難しいことです。

この講演では、まず、中間層が絶縁体および半導体の構造におけるIECに焦点を置き、鉄(Fe)/珪素(Si)/鉄(Fe)系で得られた我々の結果の一部について概説し、それらを、中間層を金属としたものを含め文献から

得たデータと比較して、結論を引き出したいと思います。金属以外の中間層でIECが観測されたのは、これまでのところ、珪素(Si)および酸化マグネシウム(MgO)を中間層とした構造に限られています。良好な格子秩序をもつエピタキシャルSiにおいては、IECは驚くほど強く、大半の金属の中間層よりもほぼ一桁も大きな値を示しました。現在通用している理論に基づけば、この研究結果からはSiを障壁層とした大きなTMRが期待されますが、この系でTMRは事実上存在しないことが判明しています。他方、良好な格子秩序をもつFeまたは(100)配向したテキスチャーをもつFeで挟んだMgO中間層では、弱い結合を示し、500%超の「巨大TMR」となりました。この違いについては、まず自由電子モデルに基づき議論を進め、次にコヒーレントトンネリングにも拡大して簡単に論じたいと思います。これに関連して、MgOの中間層を多結晶ホイスラ合金とコバルト鉄(CoFe)の薄膜で挟んだ構造でのTMRの結果についても概説します。私たちの実験では、室温(RT)で90%という注目すべきTMRを得ることができました。

次に金属の中間層について検討します。GMRを簡単に論じた後に、CIMSの物理像を明らかにして、金属障壁および絶縁体障壁の場合のIECと比較します。続いて、単結晶磁気ナノピラーにおけるCIMSの結果を紹介し

ここで取り上げる現象の用途は、主に磁気情報ストレージの分野におけるものですが、小さなパーツから大型車両や航空機に至るまでそれらの位置や移動のモニタリングにも活用できるものです。また、生体臨床医学、抗原の検出などにも新たな用途が進展しているようです。こうした可能性についても簡単に触れたいと思います。

財団法人 国際科学技術財団  
THE SCIENCE AND TECHNOLOGY FOUNDATION OF JAPAN

〒107-0052 東京都港区赤坂二丁目17番22号 赤坂ツインタワー東館13階  
Akasaka Twin Tower East, 13th Floor, 17-22 Akasaka 2-chome, Minato-ku, Tokyo, 107-0052 Japan

Tel: 03(5545)0551 Fax: 03(5545)0554 E-Mail: [info@japanprize.jp](mailto:info@japanprize.jp)  
URL: <http://www.japanprize.jp>