

# 人工微小構造制御によるスピン依存物性と新機能性材料

## Spin-dependent Phenomena in the Substances with Artificial Microstructure and Advanced Materials

(研究プロジェクト番号 : JSPS-RFTF 96P00106)

プロジェクトリーダー

藤森 啓安 (東北大学金属材料研究所・教授、平成 12 年 3 月 31 日まで)

高梨 弘毅 (東北大学金属材料研究所・教授、平成 12 年 4 月 1 日より)

コアメンバー

前川 禎通 (東北大学金属材料研究所・教授)

大沼 繁弘 ((財)電気磁気材料研究所・主任研究員)



### 1. 研究目的

新しい電子デバイスの開発やそれらの高性能化は、情報通信分野をはじめとする種々の電子機器の飛躍的進展をもたらし、21世紀に展開される新しい社会システムの構築に寄与する。現在、電気伝導をつかさどる電子の電荷と磁性をつかさどる電子のスピンが有機的に関係し合っ生じるスピン依存伝導現象が注目され、スピン依存伝導現象を利用した電子デバイス(スピンエレクトロニクスデバイス)の実現が期待されている。本研究プロジェクトでは、スピンエレクトロニクスデバイスを目指した新材料の創製と応用、および新しい物理現象の観測と解明を目的とし、グラニューラー構造体、単原子積層人工格子、微小接合構造体の3つの人工物質を対象とした。本稿では、グラニューラー構造体および微小接合構造体のスピン依存伝導現象に関する研究成果を紹介する。

### 2. 研究成果概要

#### 2.1 グラニューラー構造体におけるスピン依存伝導と新機能性材料

グラニューラー構造とは、ナノスケールの金属微粒子が絶縁体マトリックス中に密に分散した構造であり、電気伝導は微粒子間の電子のトンネル効果によって生じる。微粒子が磁性を有している場合には、スピンの依存したトンネル伝導が現れ、磁場印加によって各微粒子の磁化が揃えられていく過程で、電気抵抗が減少する。いわゆるトンネル磁気抵抗(TMR)効果が観測される。グラニューラー構造の場合、微粒子のサイズが非常に小さいので、電子のトンネルに伴う静電エネルギーの増大(微粒子帯電効果)が電気伝導に重要な役割を演じる。我々は、微粒子帯電効果によって、TMRが著しく増大することを見出した。

グラニューラー薄膜のTMRを磁気センシング素子として用いる場合、低磁場で大きな抵抗変化を得る必要がある。本研究では、Granular-In-Gap(GIG)と呼ばれる構造を開発し、グラニューラー薄膜のTMRの磁場感度を数百倍改善することに成功した。図1に、GIG構造の模式図を示す。グラニューラー薄膜を飽和磁化の大きな軟磁性薄膜のギャップ内に配し

たもので、小さな外部磁場を印加しただけで軟磁性薄膜が磁化してギャップ内に大きな漏れ磁場を生成し、それによりグラニューラー薄膜のTMRが発現する。図2に、Fe-Ni軟磁性薄膜と(Fe-Co)-MgF<sub>2</sub>グラニューラー薄膜を組み合わせたGIG構造のTMR曲線を示す。僅か数Oeの磁場印加で急峻な抵抗変化が得られている。

#### 2.2 微小接合構造体におけるスピン依存伝導と新機能性材料

理想的な微小接合の1つとして、数個の金属微粒子(ドット)の両側に電極を配した構造を作製すると、単一電子トンネル(SET)効果が発現する。SETは、微粒子帯電効果に起因して、ある閾値以下の低電圧では電流が抑制されるクーロンブロッケイドと呼ばれる現象や微粒子に蓄積した電荷量(電子の数)に対応して電流が離散化するクーロン階段と呼ばれる現象によって代表される。微粒子が磁性を有している場合、スピンの依存したSETによって、新奇な磁気伝導現象が期待される。我々は、Co-Al-Oグラニューラー薄膜を微細加工によって微小化し、トンネル経路となる微粒子の数を制限することによって、スピン依存SETの観測に成功した。図3に示すように、グラニューラー薄膜を微小電極ギャップに埋め込んだ「グラニューラーナノブリッジ」と呼ばれる構造を作製し、電流-電圧曲線に明瞭なクーロンブロッケイドを観測し、クーロンブロッケイドが破れる閾値電圧近傍でTMRが顕著な増大を示すことを明らかにした。また、図4に示すように、極薄グラニューラー層を上下電極ではさむことによって、膜面垂直方向に電流を流す構造(Current-Perpendicular-to-Planeを略して「CPP構造」と呼ばれる)を作製し、クーロン階段に伴うTMRの振動現象を発見した。これらの結果は、オーソドックス理論を用いた計算結果とも一致する。また、スピン依存SETを利用することによって、TMRの電圧制御が可能であることを示しており、TMR素子への応用という観点からも意義がある結果である。

### 3. 結論

スピンエレクトロニクスデバイスを目指し

た基礎及び応用研究を行った。グラニューラー薄膜における TMR 増大機構を解明し、センシング素子実用化に向けた磁場感度の向上に成功した。また、微細加工したグラニューラー薄膜に電極を配した微小接合構造体を用いて、スピン依存 SET 効果の観測に成功し、TMR の電圧制御が可能であることを示した。

### 主な発表論文

- (1) S. Mitani, S. Takahashi, K. Takanashi, K. Yakushiji, S. Maekawa, H. Fujimori: "Enhanced magneto-resistance in insulating granular systems", Phys. Rev. Lett., 81 (1998) 2799.
- (2) K. Takanashi, S. Mitani, K. Himi, H. Fujimori: "Oscillatory perpendicular magnetic anisotropy and lattice plane spacing in Fe/Au super-lattices", Appl. Phys. Lett., 72 (1998) 737.
- (3) N. Kobayashi, S. Ohnuma, S. Murakami, T. Masumoto, S. Mitani, H. Fujimori: "Enhancement of low-field-magneto-resistive response of tunnel-type magnetoresistance in metal-nonmetal granular thin films", J. Magn. Magn. Mater., 188 (1998) 30.
- (4) K. Yakushiji, S. Mitani, K. Takanashi, S. Takahashi, S. Maekawa, H. Imamura: "Enhanced tunnel magneto-resistance in granular nano-bridge", Appl. Phys. Lett., 78 (2001) 515.
- (5) K. Himi, K. Takanashi, S. Mitani, M. Yamaguchi, D. H. Ping, K. Hono, H. Fujimori: "Artificial modulation of magnetic structures on monatomic layer scale in Co/Ru super-lattices", Appl. Phys. Lett., 78 (2001) 1436.

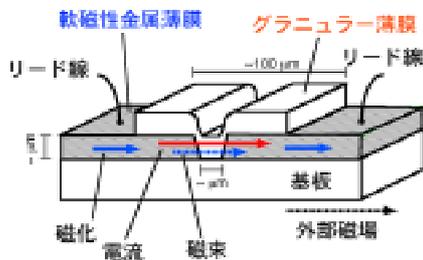


図 1. Granular-In-Gap (GIG) 構造の模式図。微小ギャップ内に強い磁場が得られ、グラニューラー薄膜に印加される。

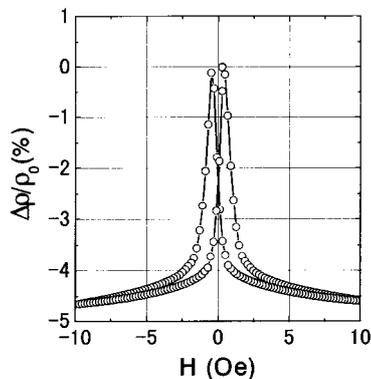


図 2. FeCo-MgF<sub>2</sub> グラニューラー薄膜と FeNi 薄膜からなる GIG 構造膜の低磁場での磁気抵抗効果。

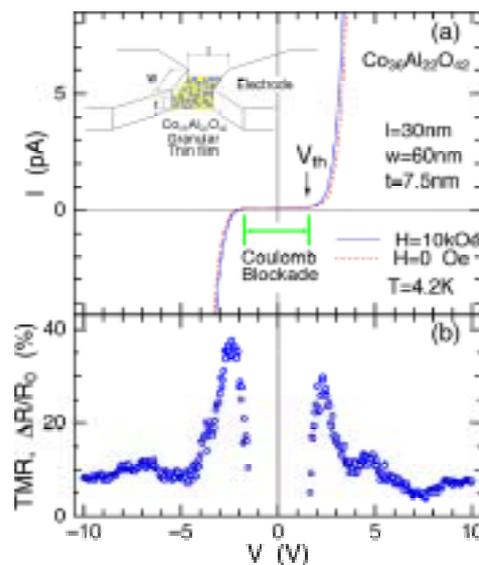


図 3. グラニューラーナブリッジ構造 (挿入図) において観測された (a) クーロンブロックと (b) トンネル磁気抵抗 (TMR) の増大。

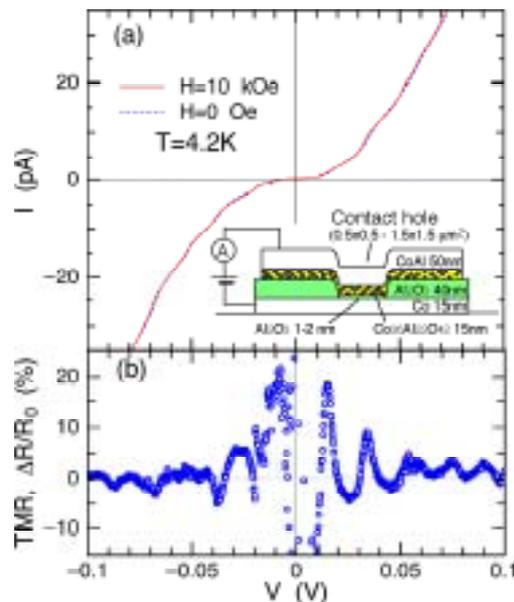


図 4. 極薄グラニューラー薄膜の膜面垂直電流 (CPP) において観測された (a) クーロン階段と (b) トンネル磁気抵抗 (TMR) の