

# 強磁場を用いた二次元金属超薄膜の電子スピン共鳴・ 強磁性共鳴によるスピン挙動の解明

## Study on electron spin resonance and ferromagnetic resonance of two-dimensional metallic thin films using high magnetic fields

東北大・金研 水口 将輝, 岡 航平, Ruihe Tang, 神田 哲典, 高梨 弘毅, 高橋 弘紀, 小山 佳一  
M. Mizuguchi, K. Oka, R. Tang, T. Koda, and K. Takanashi, K. Takahashi, K. Koyama  
IMR, Tohoku Univ.

### 1. はじめに

電子の持つ二つの自由度である「スピンと電荷」を組み合わせようという“スピントロニクス”の分野が近年非常に注目を集め、目覚ましい発展を遂げている。この萌芽的分野の中でも根幹をなす結晶成長技術の向上が、薄膜のエピタキシャル成長を可能にしてきた。しかしながら、磁気トンネル接合素子や、スピン共鳴トンネルトランジスタといった、スピン依存伝導現象を利用するデバイスの諸構造は既にナノスケールとなっているにもかかわらず、例えば二次元金属超薄膜などにおけるスピンの歳差、散乱、あるいは磁壁の量子的揺らぎなどの基礎物性は明らかになっていない。そのため、現実的なスピンデバイスへの応用のためには、解明すべき点がいまだ多いのが現状である。そこで、本研究ではエピタキシャル成長させた金属超薄膜の電子スピン共鳴(ESR)および強磁性共鳴(FMR)の測定を強磁場中で行い、電荷自由度とスピン自由度に関する動的特性(ダイナミクス)の解明を目指す。特に、強磁場を用いることにより、比較的高周波帯域におけるスピン歳差運動の観察や、スピン注入・スピン蓄積現象に大きく影響する薄膜内の伝導チャンネルにおける欠陥やピンニングサイトに関する知見を得ることができるとは。これらから超薄膜の膜厚に依存したスピン挙動の形態が明らかになり、二次元性金属に特有の物理現象を導き出すことができる。これらは、本研究の最終的な目標である「エピタキシャル二次元金属超薄膜の積層構造による新規材料開発」に資するものとなる。

昨年度までに、Fe単結晶超薄膜の低磁場におけるFMR測定を行った。本年度は、構造をグラニューラ構造に絞り、Feのナノ微粒子を内包したMgO薄膜のFMR測定を行い、強磁場における共鳴実験の予備的検討を行った。また、Coのナノ微粒子を非晶質カーボンマトリックス中に内包したグラニューラ薄膜の磁気伝導特性を強磁場中で測定し、この構造に特有の伝導特性を明らかにすることに成功した。

### 2. 実験方法

#### 2-1. Feナノ微粒子の低磁場強磁性共鳴

MgO(001)基板上にMgO緩衝層(20 nm)、Feナノ微粒子、Au保護層(4 nm)の順に分子線エピタキシーを用

いて成膜し、試料を作製した。フォトリソグラフィーを用いてコプレーナウェーブガイド(ガイド幅100  $\mu\text{m}$ )を作製し、その信号線上に試料を置いて外部磁界を印加することによりFMRの測定を行った。この際、ネットワークアナライザから高周波電流をウェーブガイドに導入し、反射波を測定してその差分をFMRシグナルとした。

#### 2-2. 非晶質カーボンマトリックスにCo微粒子を内包したグラニューラ薄膜の磁気伝導特性

試料は、スパッタ法を用いて熱酸化膜付きSi基板上にCoおよびCを同時蒸着することにより作製した<sup>[1]</sup>。グラニューラ薄膜の膜厚は数十nm程度であり、Coの濃度は6.4 at.%とした。磁気伝導特性は、強磁場超伝導材料研究センターの18T-SMにおいて0~180 kOeの磁場範囲および1.5~10 Kの温度範囲で測定した。試料にInで端子付けをし、直流4端子法により、一定磁場下で磁気抵抗効果の測定を行った。

### 3. 実験結果

#### 3-1. Feナノ微粒子の低磁場強磁性共鳴

膜厚3 nmのFeナノ粒子およびFe連続膜の双方のFMRスペクトルを測定した。連続膜においては、明確なピークを観測することができなかったのに対し、微粒子においては図1に示すように、磁場の掃引で周波数に変化するピークが観測された。同じ膜厚で構造のみが異なるFe薄膜においてこのような差が生じた原因としては、連続膜では測定限界以下で観測されなかった磁化の歳差運動が、粒子の形状をとることにより、顕著に観測することができるようになった可能性が考えられる。また、連続膜のFeは、上下両界面がAu層に接しているため、スピンポンピングの効果によりダンピングが大きくなり吸収されてしまった可能性も考えられるが、詳細は明らかになっていない。

さらに、Feナノ粒子の膜厚を小さくしていき、本測定法によりどの程度のスピン数まで共鳴ピークの観測が可能であるのかを調べた。膜厚0.3 nmの微粒子では、明確なピークは観測されず、スピン数が本手法の検出限界以下であることが推察された。本結果により、磁性ナノ粒子に対する本測定法の有効性

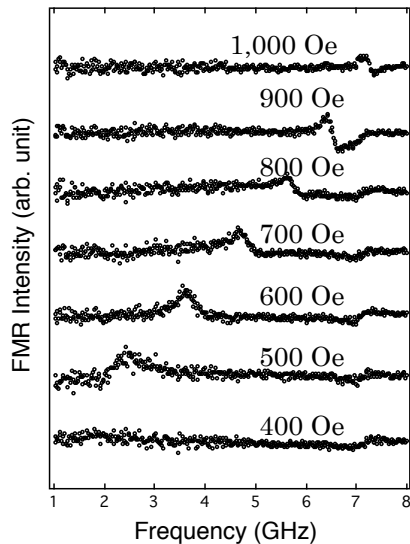


Fig. 1 Magnetic field dependence of FMR spectra of an Fe nano-particles assembly. Nominal thickness of Fe is 3 nm.

および適用限界が明らかになった。今後は、強磁場を用いたより精度の高い共鳴測定を行い、スピン挙動を明らかにする必要がある。

### 3-2. 非晶質カーボンマトリックスに Co 微粒子を内包したグラニューラー薄膜の磁気伝導特性

図 2 に、18T-SM を用いて測定したグラニューラー薄膜の磁気抵抗(MR)曲線の温度依存性を示す。1.5 K では 180 kOe の磁場で MR 比 45% 程度の大きな負の磁気抵抗効果が観測された。また、4.2 K では、MR 比は 10% 程度まで減少した。これらの負の磁気抵抗効果は、グラニューラー構造でよく見られるトンネル型の磁気抵抗効果と考えられる。さらに、測定温度を 10 K にして磁気伝導特性を測定したところ、3 種類の成分により構成される MR 曲線を得た。0~40 kOe の低磁場領域では、正の磁気抵抗効果が観測された。この磁気抵抗の原因は明らかになっていないが、非晶質カーボンマトリックス特有の磁気抵抗であると考えられる。一方、40~100 kOe の磁場範囲では、負の磁気抵抗効果が観測された。これは、低温で顕著に見られたトンネル型の磁気抵抗効果である。さらに、100 kOe 以上の高磁場で、再び正の磁気抵抗効果が観測された。この成分は、電子のローレンツ力に起因する正常磁気抵抗効果で良く説明できる。結果として、強磁場マグネットを使用することにより、グラニューラー構造における複雑な磁気伝導機構の解明の手がかりをつかむことができた。

### 4. まとめ

強磁場中での共鳴測定の準備実験として、低磁場において Fe のナノ微粒子を内包した MgO 薄膜の FMR 測定を行った。コプレーナウェーブガイドを用いた FMR 測定の結果、Co 微粒子の FMR 信号を観測することに成功した。また、強磁場を用いて非晶

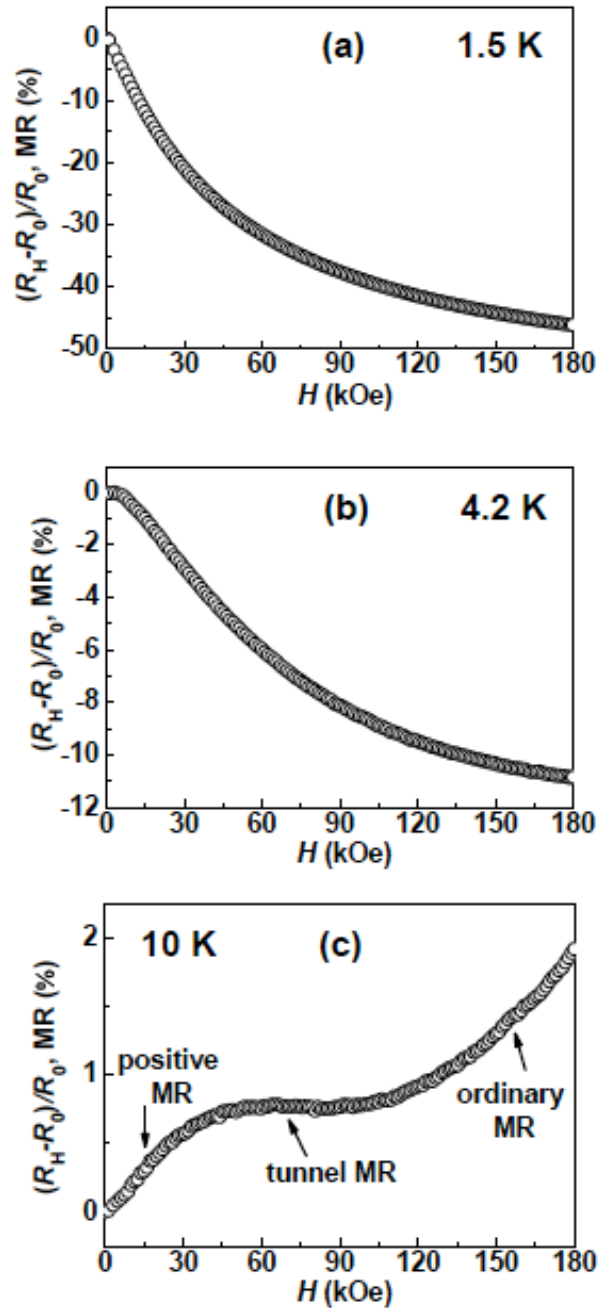


Fig. 2 MR curves measured under high magnetic fields up to 180 kOe for Co-C granular thin films measured at (a) 1.5K, (b) 4.2 K, and (c) 10 K.

質カーボンマトリックスに Co 微粒子を内包したグラニューラー薄膜の磁気伝導特性を測定した結果、測定温度に強く依存した磁気抵抗効果を観測することができた。

### 参考文献

- [1] R. Tang, M. Mizuguchi, H. Wang, R. Yu, and K. Takanashi, "Strong Temperature Dependence of Magnetoresistance in Co-C Granular Thin Films", IEEE Trans. Magn., *in press*.