

核共鳴散乱法を用いた Cr 系ナノ薄膜における磁氣的  
フラストレーション効果の探査と解明  
Investigation on Magnetic Frustration Effects in Cr-Based Nano-Films  
using Nuclear Resonant Scattering

壬生 攻<sup>1,2</sup>、張 維<sup>1,2</sup>、瀬戸 誠<sup>3,2,4</sup>、小林康浩<sup>3,2</sup>、三井隆也<sup>4,2</sup>

\*K. Mibu<sup>1,2</sup>, W. Zhang<sup>1,2</sup>, M. Seto<sup>3,2,4</sup>, Y. Kobayashi<sup>3,2</sup>, T. Mitsui<sup>4,2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋工業大学大学院工学研究科、<sup>2</sup> CREST-JST、<sup>3</sup> 京都大学原子炉実験所、

<sup>4</sup> 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, <sup>2</sup>CREST-JST,

<sup>3</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University,

<sup>4</sup> Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency

ナノスケールの厚さをもつ Cr 層とその上に蒸着された <sup>57</sup>Fe 単原子プローブ層の磁性を、<sup>57</sup>Fe 核共鳴散乱時間スペクトルを通じて探った。Cr 層の下地に厚さ 10 nm の強磁性 <sup>56</sup>Fe 層を敷いた試料と敷かない試料のスペクトルを測定したところ、<sup>56</sup>Fe 下地層の有無や Cr 層の厚さに依って明確な違いが観測され、Cr 層の環境に依存して <sup>57</sup>Fe プローブが感じる有効磁場が変化していることを示唆する結果が得られた。下地の強磁性 <sup>56</sup>Fe 層と Cr 層の界面における磁氣的フラストレーション効果の影響を受けて Cr 層の磁気構造が変化し、<sup>57</sup>Fe プローブ層の磁性や内部磁場に影響を及ぼしているものと解釈される。

Magnetic properties of nanoscale Cr films and monatomic <sup>57</sup>Fe probe layers deposited on them were investigated using <sup>57</sup>Fe nuclear resonant scattering. It was observed that the time spectra of X-rays resonantly scattered from the probing nuclei were different among samples with different Cr layer thickness and also between samples with and without a ferromagnetic <sup>56</sup>Fe(10 nm) layer under the Cr layer. The results suggest that the magnetic structure of the Cr layer and also the magnetic hyperfine field at the <sup>57</sup>Fe probes are changed by the existence of the underlaid ferromagnetic <sup>56</sup>Fe layer due to the magnetic frustration effect at the <sup>56</sup>Fe/Cr interface.

#### 背景と研究目的

ナノメートルサイズの磁性薄膜や磁性構造体における局所磁性や局所電子スピン分極に関する実験データは、磁性体ナノテクノロジーやスピントロニクス発展のために重要な情報源となる。メスバウアー分光法など原

子核をプローブとした実験法は、このような局所磁性の測定手段として極めて有効である。メスバウアー分光法を単結晶基板上に作製したナノ薄膜やナノ構造体に適用するにあたっては、いわゆる反射配置での測定が不可欠であるが、通常の線源実験で用られる内部

転換電子検出法では実験環境に対する制約が多く、低温における測定、磁場・電場中での測定、低プローブ濃度試料の測定などが困難になる。これらの欠点を補う測定手段として、最近発展が著しい放射光核共鳴散乱法(放射光メスバウアー分光法)の利用が有望である。

このような背景のもと、当研究グループでは、放射光核共鳴散乱法を用いた磁性薄膜・ナノ構造体の局所的磁性に関する研究を進めてきた。2006B期は2005B・2006A期に引き続き、Cr層上に蒸着した $^{57}\text{Fe}$ 単原子層に誘起される内部磁場を、核共鳴散乱スペクトルを通じて検出する実験を行った。Cr層の下地に強磁性 $^{56}\text{Fe}$ 層が存在する試料と存在しない試料を作製し、Cr層上の $^{57}\text{Fe}$ 単原子層に誘起される内部磁場の違いを調べることによって、強磁性 $^{56}\text{Fe}$ 層/反強磁性Cr層界面における磁氣的フラストレーション効果[1]が、Cr層やさらにその上の $^{57}\text{Fe}$ 単原子層の磁性に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。今期はCr層の厚さ依存性や低

温領域での測定を行い、系統的にデータを集めて比較することによって、一連の試料の磁氣的状況を整理・解明することを目指した。

## 実験

$^{57}\text{Fe}$ 原子核のメスバウアー共鳴エネルギー(14.4 keV)に合わせたアンジュレーター放射光を、高分解能モノクロメータを用いてバンド幅数 meV 程度に絞ったのち試料に入射し、試料による核共鳴散乱時間スペクトルをアバランシェ・フォトダイオード (APD) 検出器を用いて測定した。試料最表面付近にわずか1原子層蒸着されたプローブ核によって入射X線を効率的に共鳴散乱させるために、薄膜面すれすれ入射の全反射配置での測定を行った。X線パルス入射直後から次のパルスが入射される直前まで(今回の運転モードではバンチ間隔 114 ns)の散乱強度を時間に対して積算することによって、プローブ核に共鳴散乱されたX線の時間スペクトルを測定した。これらのスペクトルから核が有効に感じている内部磁場を導き出し、核サイトにおける局

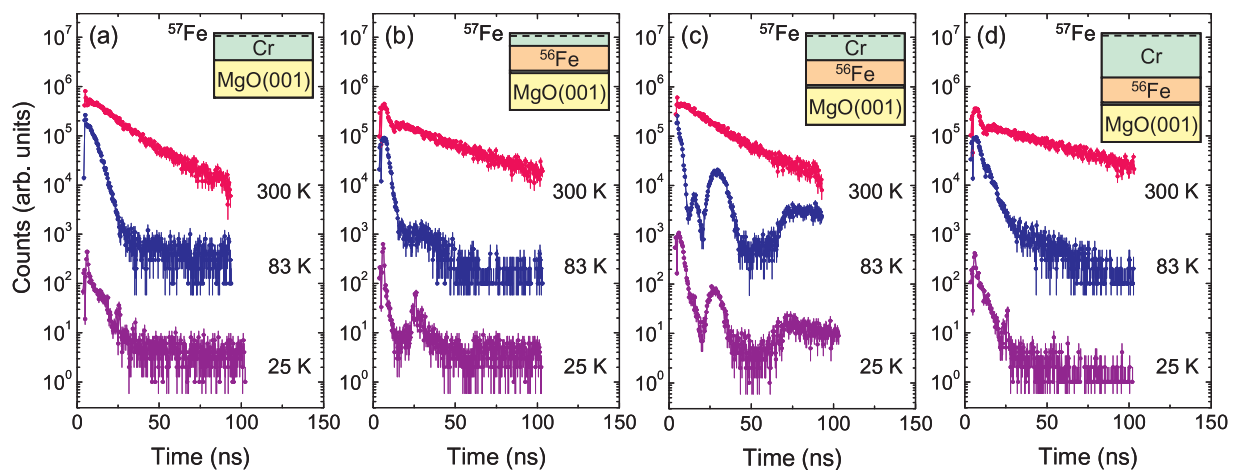


Fig. 1 Nuclear resonant time spectra for an  $^{57}\text{Fe}$ (0.2 nm) layer deposited on a Cr film with and without an  $^{56}\text{Fe}$ (10 nm) underlayer at 300, 83, and 25 K

- (a) MgO(001)/Cr(10 nm)/ $^{57}\text{Fe}$ (0.2 nm)/Cr(1 nm)
- (b) MgO(001)/Cr(1 nm)/ $^{56}\text{Fe}$ (10 nm)/Cr(4 nm)/ $^{57}\text{Fe}$ (0.2 nm)/Cr(1 nm)
- (c) MgO(001)/Cr(1 nm)/ $^{56}\text{Fe}$ (10 nm)/Cr(10 nm)/ $^{57}\text{Fe}$ (0.2 nm)/Cr(1 nm)
- (d) MgO(001)/Cr(1 nm)/ $^{56}\text{Fe}$ (10 nm)/Cr(17 nm)/ $^{57}\text{Fe}$ (0.2 nm)/Cr(1 nm)

所磁性に関する情報を得ることを目指した。液体ヘリウムフロー型クライオスタットに試料をセットし、300 ~ 25 K の温度領域で測定を行った。

### 結果および今後の課題

Figure 1 に、厚さ 4 ~ 17 nm の Cr 層上に  $^{57}\text{Fe}$  単原子層 (0.2 nm) を蒸着した 4 つの試料の核共鳴散乱時間スペクトルの温度依存性を、試料の構成図と共に示す。Cr 層の下地に 10 nm の強磁性  $^{56}\text{Fe}$  層がある場合とない場合で、また強磁性下地層がある場合でも Cr 層の厚さに依存してスペクトルに明確な違いが現れ、Cr 層の環境に依存して磁性が変化し、 $^{57}\text{Fe}$  プローブ核が感じる内部磁場の違いに反映されていることを示す結果が得られた。

得られた時間スペクトルは強磁性 Fe に典型的なスペクトルからは大きく異なっており、内部磁場の分布あるいは揺らぎが存在することが示唆されている。また、散乱 X 線進行方向の試料の有効厚みに依存するいわゆるダイナミカル効果もスペクトルの形状に影響を与えていると予測される。現時点では、時間スペクトルのフィッティングに成功するには至っていないが、以下のような情報が得られている。

- (1) 室温では、すべての試料において  $^{57}\text{Fe}$  単原子層は常磁性的である。
- (2) 室温においては、ダイナミカル効果の影響により、核の脱励起寿命が自然寿命の 5 倍程度までスピードアップしている。
- (3) 低温において、核脱励起のスピードアップが顕著になる。(ダイナミカル効果の温度変化に依るものか、広く分布した内部磁

場の発現を反映したものかは不明。)

- (4) 低温のスペクトルは試料に依って異なっており、Cr 層およびその上に蒸着された  $^{57}\text{Fe}$  単原子層の磁性が Cr 層の環境によって異なっていることが示唆されている。
- (5) 下地  $^{56}\text{Fe}$  層あり Cr (10 nm) 層上の  $^{57}\text{Fe}$  単原子層は、低温において内部磁場の発現を反映した明確な量子ビートを示し、しっかりと磁気秩序をもっていることが示唆されている。
- (6) 何れの試料においても、83 ~ 25 K の間に劇的な磁性の変化は観測されていない。

今後、さらに実験条件の最適化を進め、必要となるプローブ層の厚さや測定時間の低減を進めると共に、系統的にデータを蓄積していくことによって、これらの系の局所磁性を明らかにしていくことが課題となっている。

### 参考文献

- [1] Mibu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 2243.