

# 共鳴X線磁気散乱による間接交換結合多層膜の 非磁性層の誘起磁性

細糸信好

奈良先端科学技術大学院大学  
物質創成科学研究科



1. Fe/Au系の間接交換結合とAu層の誘起磁性
2. 共鳴X線磁気散乱法
3. Fe/Au多層膜中のAu層磁気構造
  - Fe層飽和磁化状態でのAu層磁気構造 (磁場に平行な磁化  $M_{\text{Au//}}$ )
  - Au層誘起磁化 ( $M_{\text{Au//}}$ ) の磁化過程
  - Fe層反平行磁化状態でのAu層磁気構造 (磁場に直交な磁化  $M_{\text{Au}\perp}$ )
  - Au層誘起磁化 ( $M_{\text{Au//}}, M_{\text{Au}\perp}$ ) のベクトル磁化過程

# 共同研究者

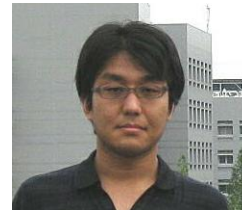
## Fe/Au系の研究に携わった学生



Dr. T. Ohkochi  
(現在JASRI/SPring-8)



Dr. K. Kodama  
(現在 奈良高専)



Dr. R. Yamagishi



Mr. S. Amasaki



Mr. M. Tokunaga



Mr. K. Sano



Mr. K. Fukui

# Fe/Au系の間接交換結合

## 振動的間接交換結合の観測例

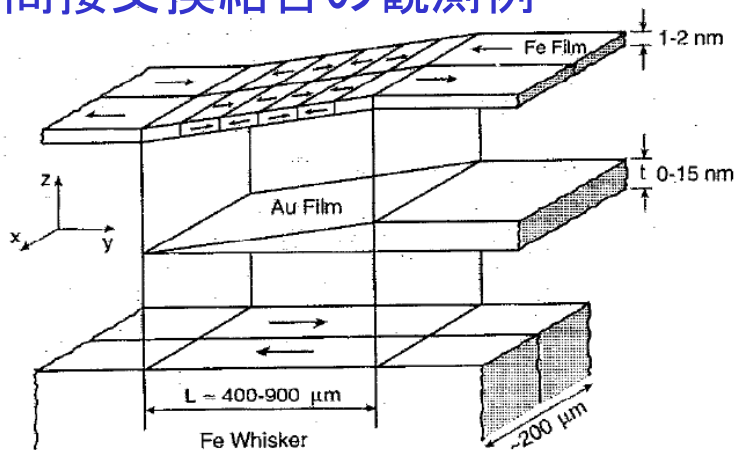


FIG. 1. An exploded schematic view of the sample structure showing the Fe(100) single-crystal whisker substrate, the evaporated Au wedge, and the Fe overlayer. Arrows in the Fe show the magnetization direction.

磁気抵抗

残留磁化

飽和磁場

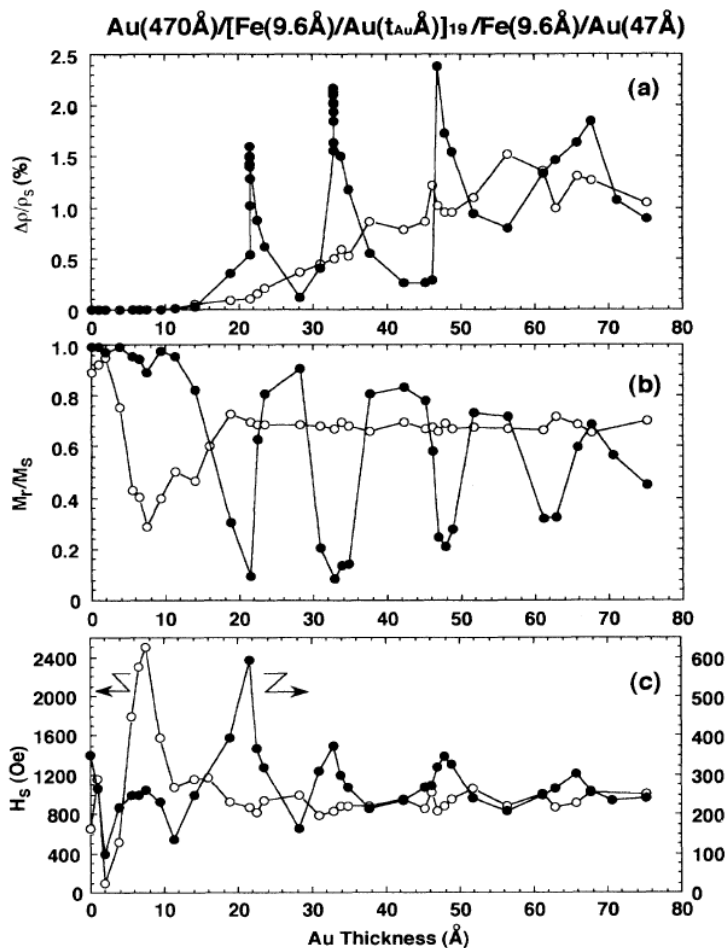
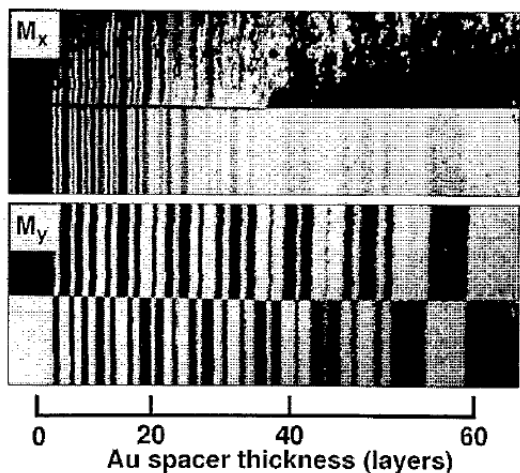


FIG. 6. Au-spacer-layer thickness dependence of the (a) MR ratio, (b)  $M_v/M_s$ , and (c)  $H_s$  of Au(470 Å)/[Fe(9.6 Å)/Au( $t_{Au}$  Å)]<sub>19</sub>/Fe(9.6 Å)/Au(47 Å) on GaAs substrates [●, single-crystal-like Fe/Au(100) multilayers] and glass substrates [○, polycrystalline Fe/Au(111) multilayers] at RT.  $\Delta\rho/\rho_s = [\rho(H) - \rho(H=H_s)]/\rho(H=H_s)$ .

SEMPA Image



直交成分

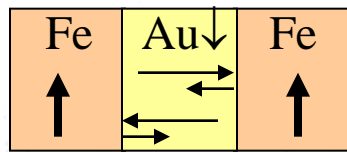
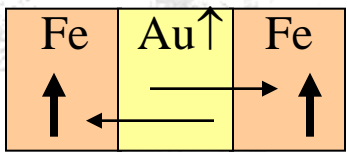
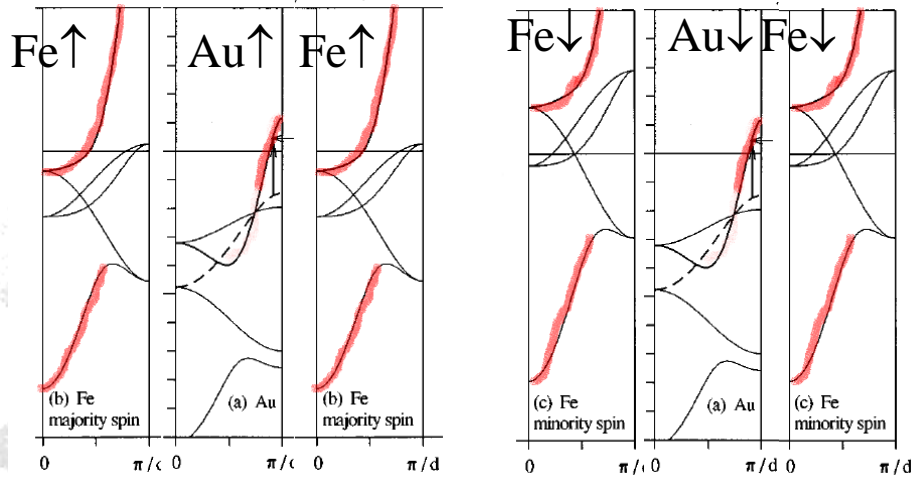
平行成分

FIG. 3. SEMPA images from the five-layer-thick Fe overlayer, showing the in-plane magnetization components along the wedge,  $M_y$ , and orthogonal to the wedge,  $M_x$ .

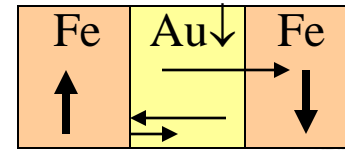
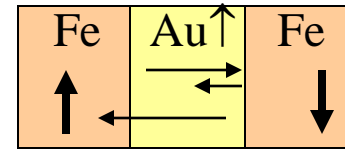
# 量子井戸モデルと非磁性層誘起磁性

## Fe磁化平行配列状態

### [001]方向のバンド構造



## Fe磁化反平行配列状態



反平行状態でもAu伝導電子に強磁性状態と異なった誘起スピン分極が発生する可能性がある。

Au ↑スピン伝導電子の閉じ込めは起こらない

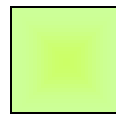
Au ↓スピン伝導電子の閉じ込めが起こる

Au ↑スピン伝導電子と↓スピン伝導電子の空間分布に差が生じる。  
→Au伝導電子に誘起スピン分極が発生  
どのようにして検出するか？



# 円偏光硬X線共鳴磁気散乱

入射円偏光X線

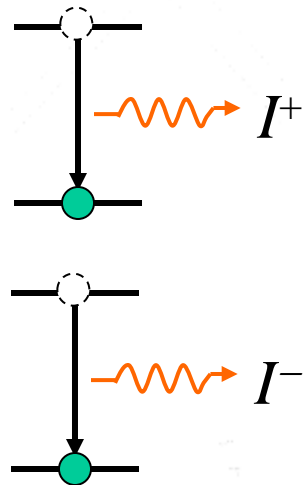
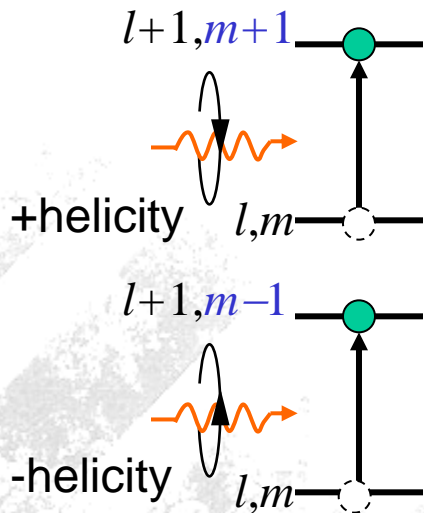


散乱X線



X線の吸収と電子の励起

電子の脱励起とX線の放出



散乱体が“強磁性”の場合  
 $I^+(2\theta) \neq I^-(2\theta)$

円偏光ヘリシティ $P_2$ に依存する散乱強度

$$I^{P_2} = -P_2 (\hat{k} + \hat{k}' \cos 2\theta) \cdot \text{Re}[F_c^* F_m(q, E)] \quad \text{共鳴磁気散乱}$$

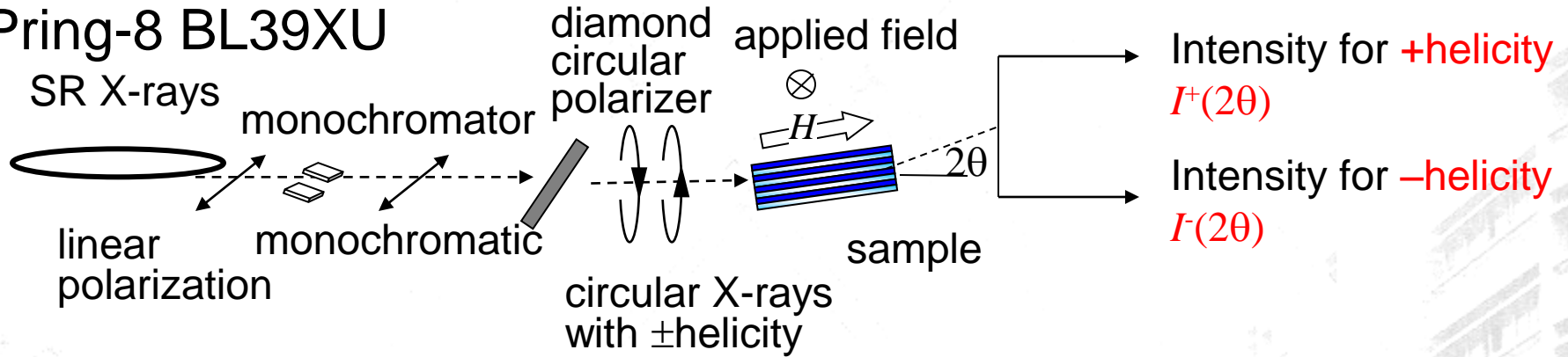
$$- \tau P_2 (1 - \cos 2\theta) \text{Re}\left\{ F_c^* \left[ (1 + \cos 2\theta) (\hat{k} + \hat{k}') \cdot F_l(q) + (\hat{k} \cos 2\theta + \hat{k}') \cdot F_s(q) \right] \right\} \quad \text{非共鳴磁気散乱 (小角では弱い)}$$

共鳴磁気散乱の特徴

- 元素、軌道選択性 (X線エネルギー依存) → 非磁性層の誘起磁性の研究に適している
- 深さ分解能 ( $q$ 依存)

# 円偏光共鳴X線磁気散乱実験

SPring-8 BL39XU

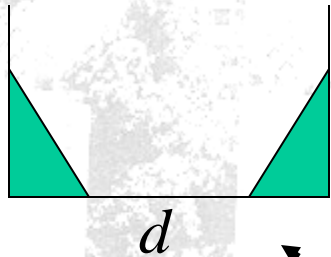


ヘリシティ反転による差強度 ← 小角ではX線進行方向にほぼ平行

$$I^+(2\theta) - I^-(2\theta) = -\left(\hat{k} + \hat{k}' \cos 2\theta\right) \left[ F_c^* F_m(q, E) + F_c F_m^*(q, E) \right]$$

元素選択的磁気構造  $M(d)$

元素&軌道  
選択的



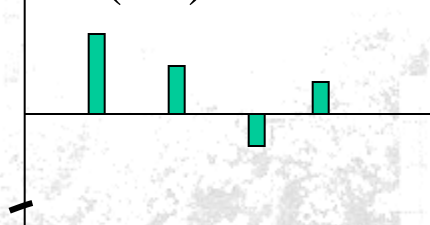
$$F_m(q, E)$$

$\Delta I(2\theta)$

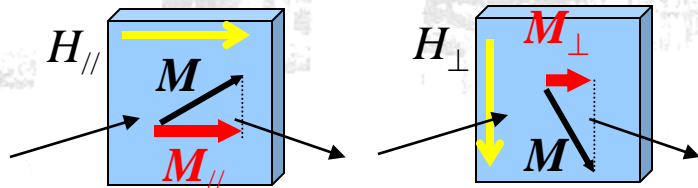
深さ分解能

$2\theta$

data analysis



ベクトル磁気構造



$H_{//}$ 印加  $M_{//}$  (parallel component of  $M$ )

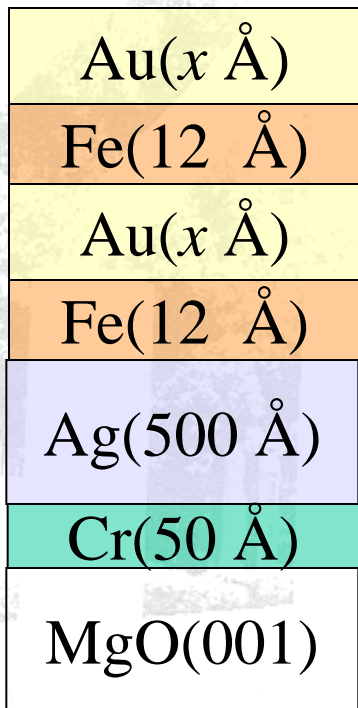
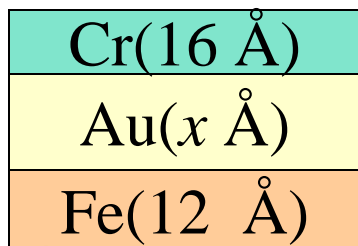
$H_{\perp}$ 印加  $M_{\perp}$  (orthogonal component of  $M$ )

# Fe/Au(001) 試料

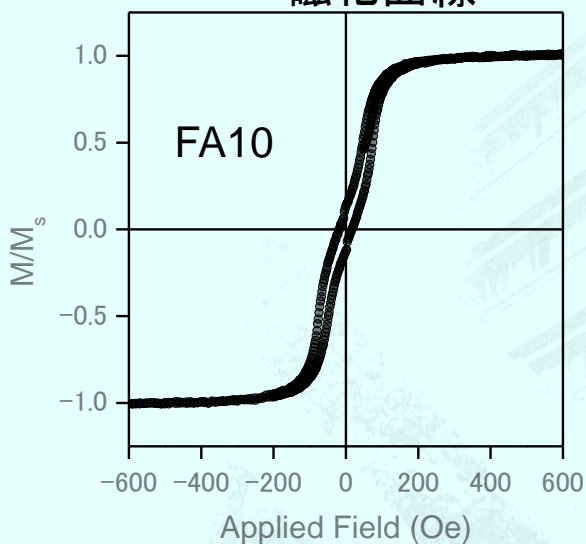
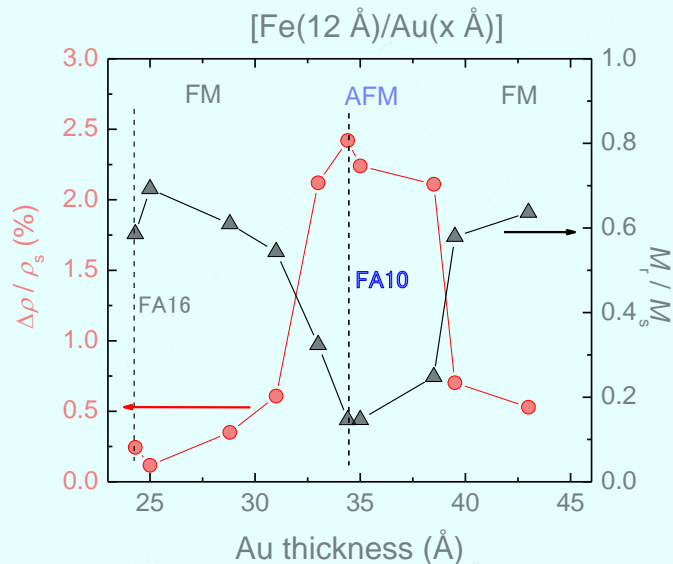
MgO(001)基板上にエピタキシャル成長したbcc Fe(001)/ fcc(001)Au多層膜

磁気抵抗比と残留磁化

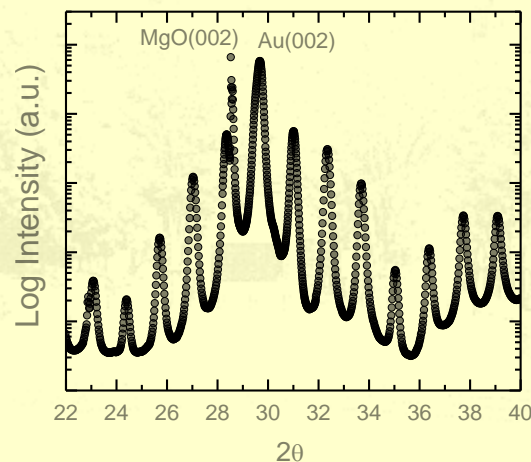
磁化曲線



×31



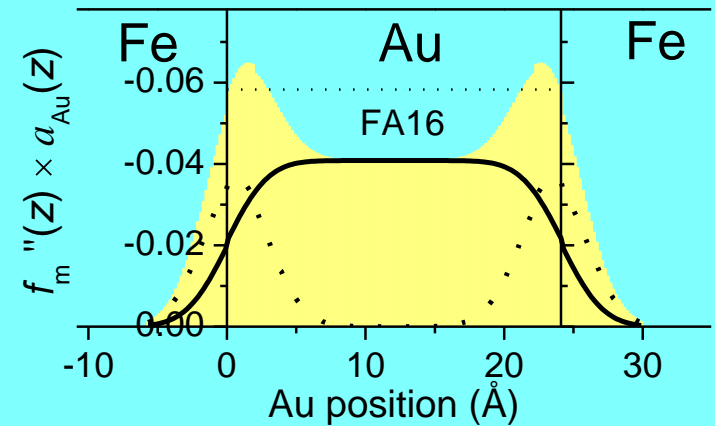
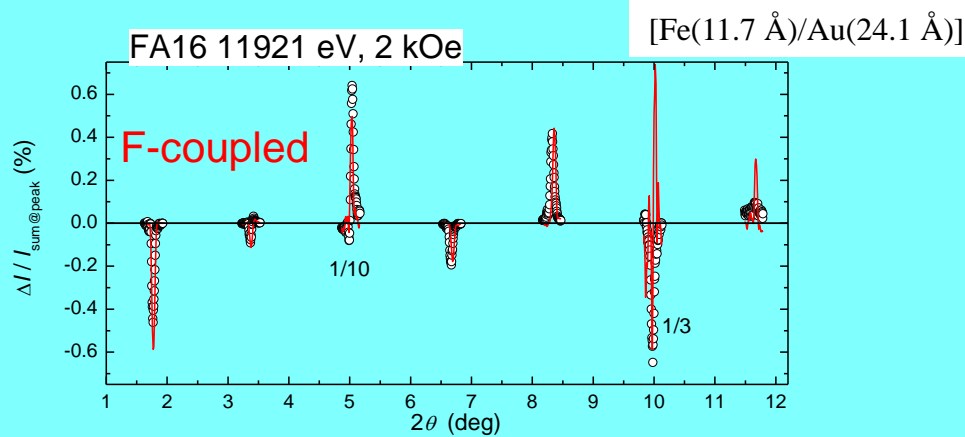
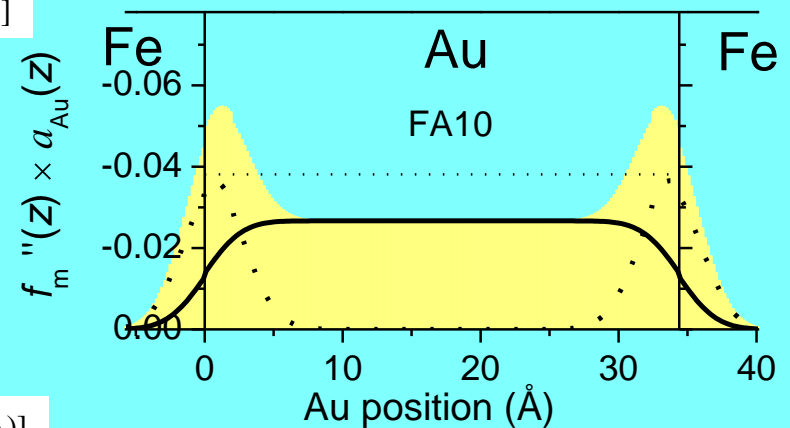
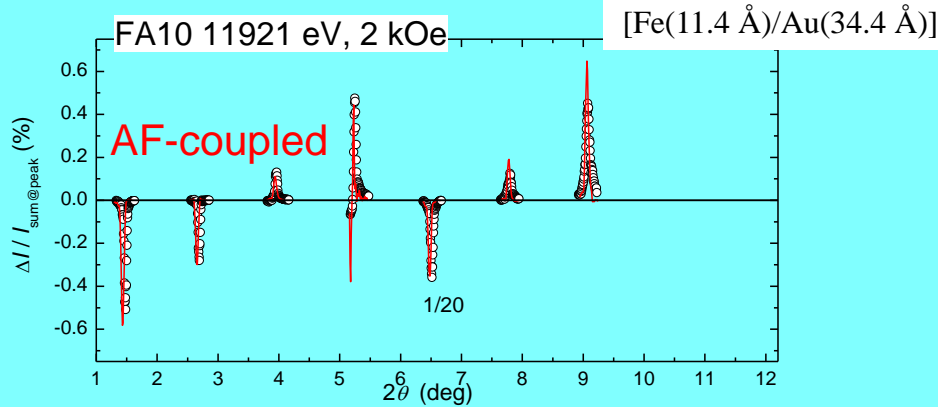
Au 002 まわりのX線回折パターン



AF-coupled  
[Fe(11.4 Å)/Au(34.4 Å)]

F-coupled  
[Fe(11.7 Å)/Au(24.1 Å)]

# Fe層飽和磁化状態の誘起Auスピン分極



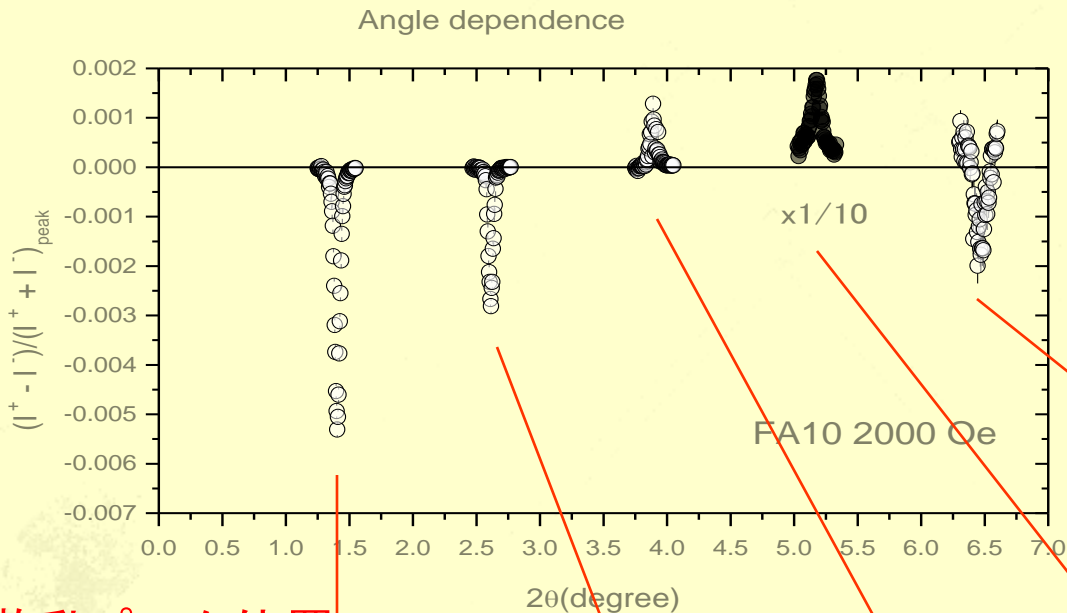
磁気散乱振幅密度

$$p_s(z) = f_m(z) c_{Au}(z) = f_m^{\text{XMCD}} \left[ f_m^{\text{interface}} c_{Fe}(z) + f_m^{\text{itinerant}} \right] c_{Au}(z)$$

- スピン分極は界面成分と一様成分(遍歴成分)の和で表される。
- 飽和磁化状態では強磁性結合(F)と反強磁性結合(AF)で顕著な差は無い。
- Au層あたりのスピン分極量はAu膜厚によらずほぼ一定(←XMCD強度)。



# 反強磁性結合試料のAu層磁化過程 ( $M_{Au//}$ 成分) I



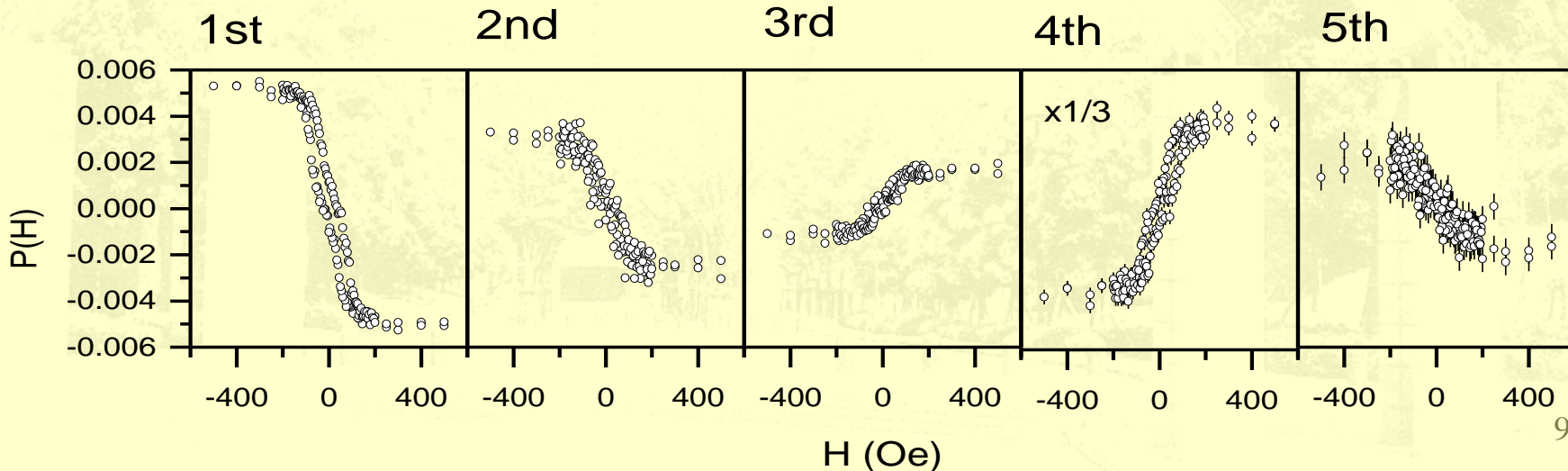
AF-coupled  
[Fe(11.4 Å)/Au(34.4 Å)]

強度比

$I_1(H):I_2(H):I_3(H):I_4(H):I_5(H)$   
一定

磁気散乱ピーク位置  
で磁場変化測定

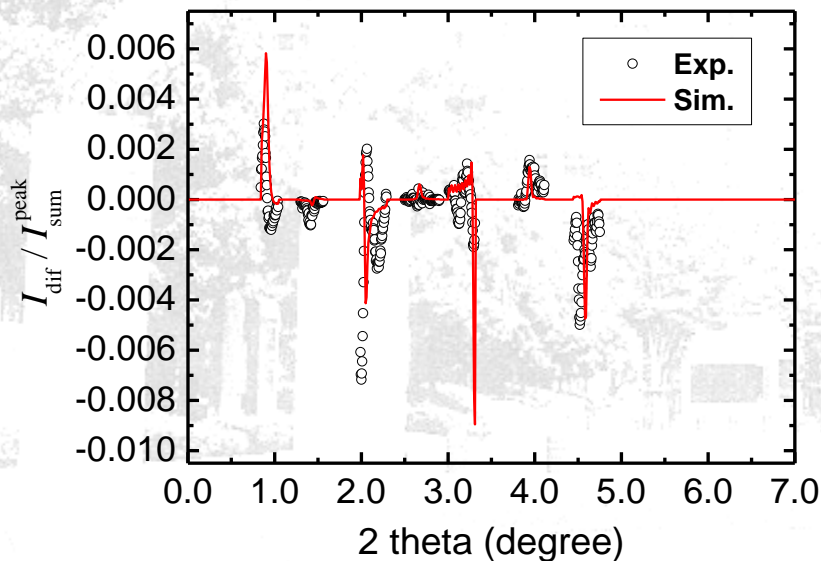
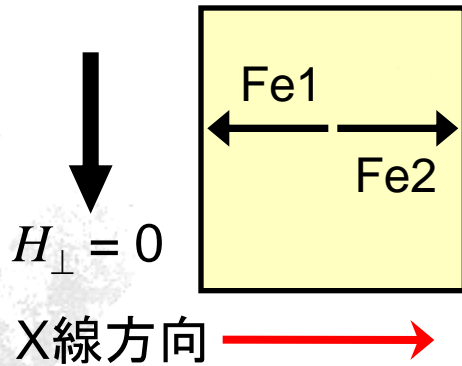
Magnetic reflectivity hysteresis



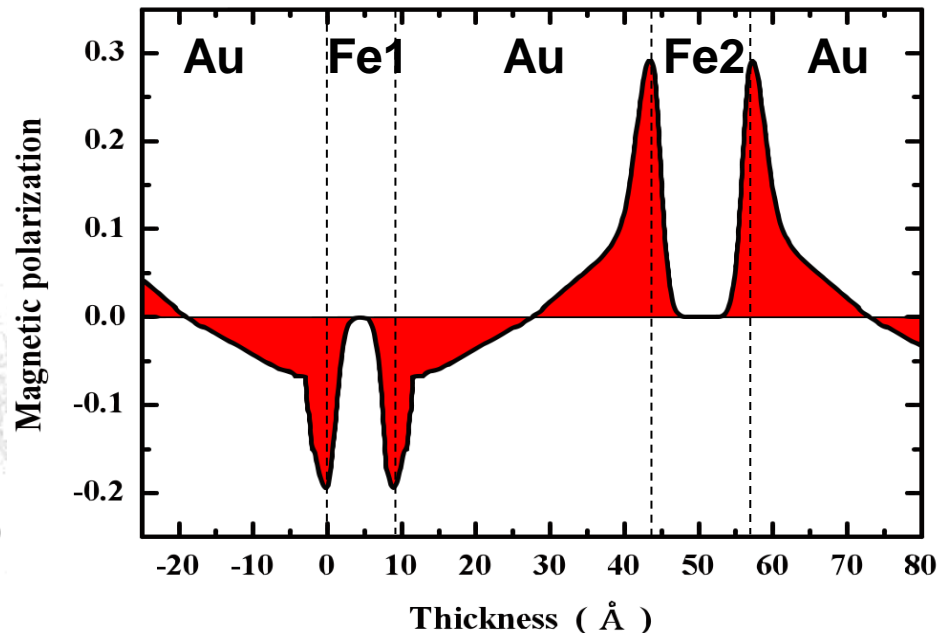


# ゼロ磁場におけるAu層直交磁化過程 ( $M_{Au\perp}$ 成分)

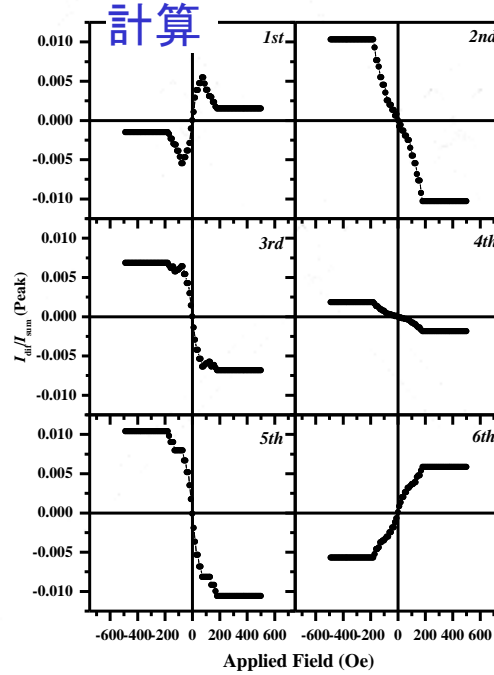
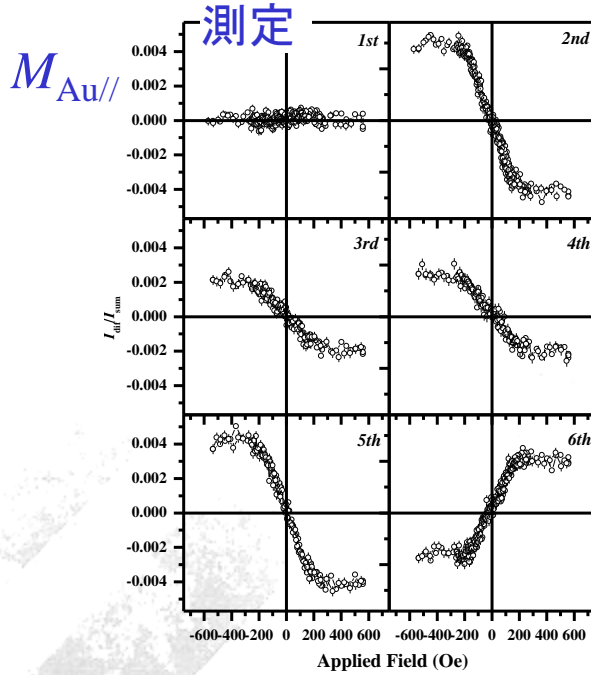
- 一倍周期試料 [Fe(11.4 Å)/Au(34.4 Å)/Fe(11.4 Å)/Au(34.4 Å)]  
電荷散乱の消滅則のため二倍周期磁気構造の観測は原理的に不可能。
- 二倍周期試料 [Fe(9 Å)/Au(35 Å)/Fe(13 Å)/Au(35 Å)] を用いて  
ゼロ磁場での直交磁化成分  $M_{Au\perp}$  を測定



Au直交磁化成分  $M_{Au\perp}$  の磁気構造



# Au層のベクトル磁化過程 ( $M_{Au//}$ , $M_{Au\perp}$ )



磁場印加方向  $H//Fe[100]$

一倍周期Fe/Auの結果

$$f_{m,eff}(E_0, z, H)$$

$$= \left\{ f_{m,av}(E_0) a_{Au}(z) [f_{m,interface} a_{Fe}(z) + f_{m,itinerant}] \right\} \times \frac{M_{Fe//}(H)}{M_{Fe}}$$

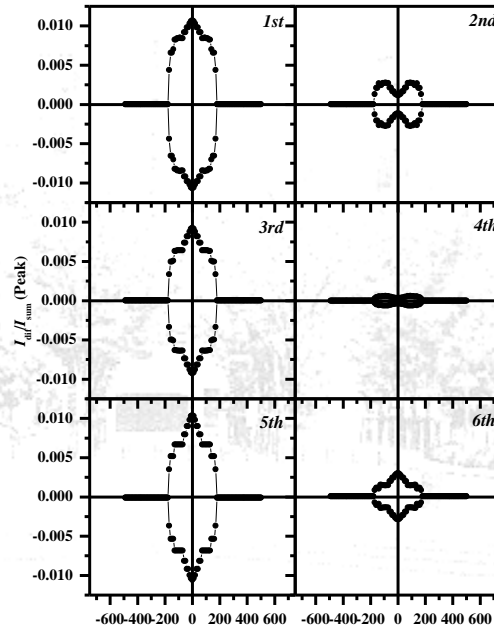
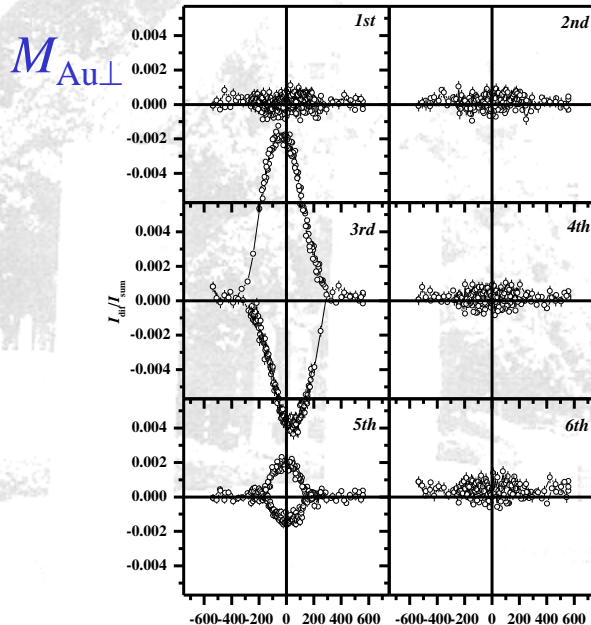
$$\frac{M_{Fe//}(H)}{M_{Fe}} = \cos \theta$$

二倍周期Fe/Auに拡張

$f_{m,eff//}^{(i)}(E_0, z, H)$  平行成分

$$= \left\{ f_{m,av}(E_0) a_{Au}(z) [f_{m,interface} a_{Fe}(z) + f_{m,itinerant}] \right\} \times \gamma_{//}(i)$$

$$\gamma_{//}(i) = \cos \theta + \frac{(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)}{n-1} (i-1)$$



$f_{m,eff\perp}^{(i)}(E_0, z, H)$  直交成分

$$= \left\{ f_{m,av}(E_0) a_{Au}(z) [f_{m,interface} a_{Fe}(z) + f_{m,itinerant}] \right\} \times \gamma_{\perp}(i)$$

$$\gamma_{\perp}(i) = \sin \theta_1 + \frac{(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)}{n-1} (i-1)$$

$\theta_1, \theta_2$ はFe層磁化過程のシミュレーションから求めた。



# Au層誘起磁気構造の磁場変化

