



# 軟X線深さ分解XAFS/XMCD法によるスピントロニクス材料研究の夜明け

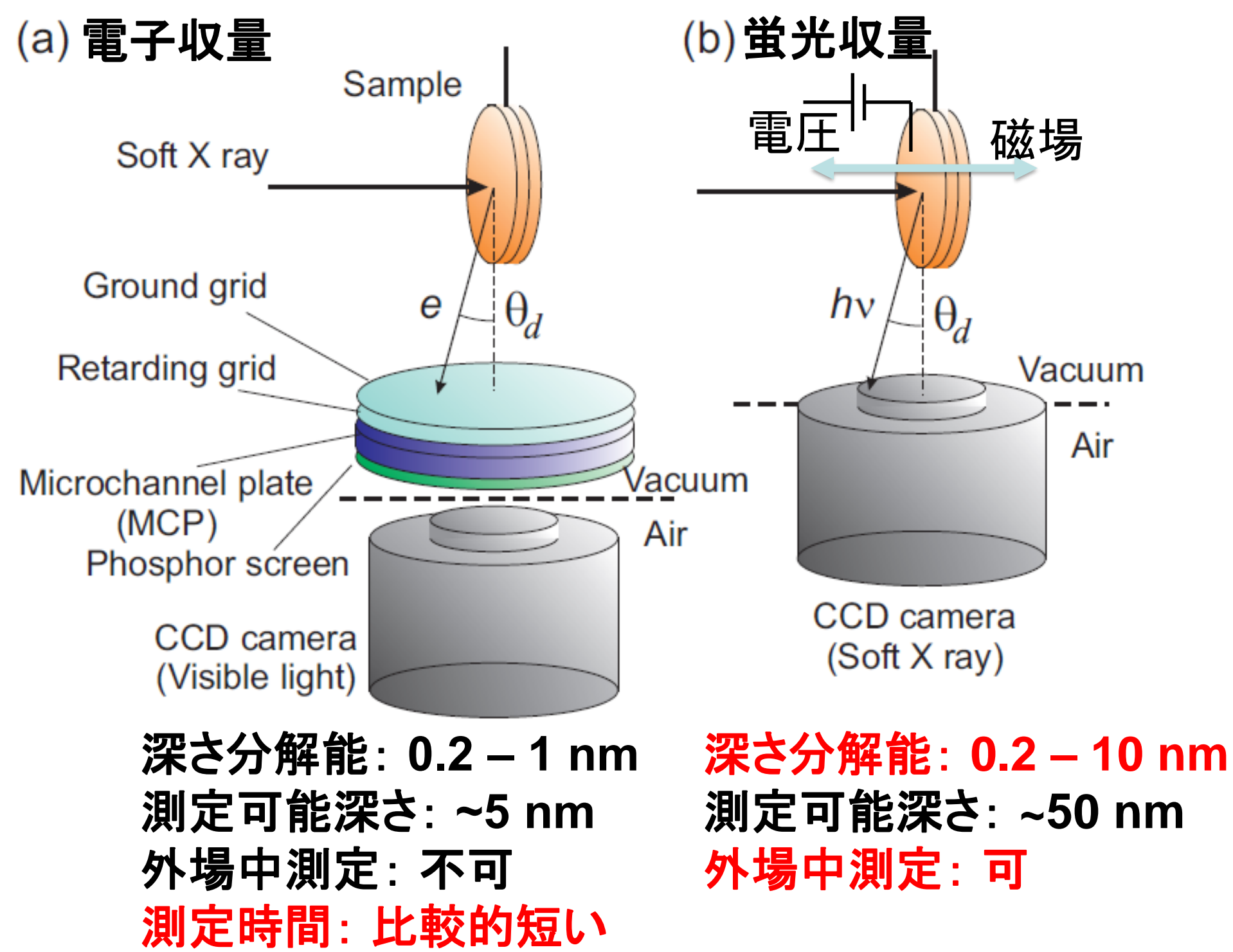
## Daybreak of spintronics material research by means of soft X-ray depth-resolved XAFS/XMCD technique

### 実験責任者 雨宮 健太 (KEK物構研)



軟X線領域の深さ分解XAFS/XMCD法は雨宮らがPFにおいて世界に先駆けて開発してきた手法であり、磁性薄膜の化学状態、磁気状態の深さ方向の分布を、ナノメートルを超える深さ分解能で元素選択的に観察できる、世界的に見てもユニークかつ極めて強力なものである。雨宮と鈴木は、この手法を様々な磁性薄膜に応用し、磁気的性質の鍵を握る界面の観察への有効性を示すとともに、手法の高度化、測定・解析の効率化を進めてきた。これを受けて本研究では、磁性薄膜を用いたスピントロニクス材料の開発において革新的な成果を挙げている第一線の研究者を結集し、深さ分解XAFS/XMCDの応用を飛躍的に進めることによって、世界を先導する研究成果をPFから創出することを目的としている。スピントロニクス材料の機能発現においては、磁性薄膜の界面の状態が決定的な役割を果たしており、まさに深さ分解XAFS/XMCDが威力を発揮する分野である。本研究ではさらに、最近開発に成功した磁場・電場中での深さ分解XAFS/XMCD法を駆使したオペランド測定を用いて、磁性薄膜の界面を動作中に近い状態で観察することによって、次世代スピントロニクス材料の開発につなげることを目指す。

### 実験手法 電子 or 蛍光X線の角度で検出深度を制御



### 実験参加者

手法開発, 装置の整備:

雨宮健太 (物構研), 阪田薫穂 (物構研), 鈴木真粒子 (群馬大, 2021年度まで物構研客員)

材料研究 (測定, 解析含む):

桜庭裕弥, CHEN Zixi, 藤田裕一, 磯上慎二, 首藤浩文(NIMS), 永沼博(東北大), 三輪真嗣, 坂本祥哉, 安藤遼哉, 辻川貴也, 志賀雅直(東大), 薬師寺啓(産総研), 柳原英人, 小野田浩成(筑波大), 櫻井浩, 伊藤遥, 石井翔也(群馬大), 安川雪子(千工大)

### 成果 原著論文: 13報, Proceedings: 1報

[1] M. Suzuki-Sakamaki et al., Proc. International Conference on Technology and Social Science (2021).  
 [2] K. Sakata et al., Nano Lett. 21 (2021) 7152. <https://doi.org/10.1002/admi.202101034>  
 [3] Y. Fujita et al., Phys. Rev. B 104 (2021) L140403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.L140403>  
 [4] M. Shiga et al., Phys. Rev. B 104 (2021) L140406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.L140406>  
 [5] S. Sakamoto et al., Phys. Rev. B 104 (2021) 134431. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.134431>  
 [6] H. Onoda et al., Adv. Mater. Interfaces 8 (2021) 2101034. <https://doi.org/10.1002/admi.202101034>  
 [7] H. Naganuma et al., ACS Nano (2022). <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c09843>  
 [8] S. Sakamoto et al., ACS Appl. Electron. Mater. 4 (2022) 1794. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c00049>  
 [9] H. Suto et al., J. Mag. Magn. Mater. 557 (2022) 169474. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169474>  
 [10] K. Amemiya and K. Sakata, Phys. Rev. B 106 (2022) 134424. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.134424>  
 [11] K. Sakata and K. Amemiya, J. Phys. Chem. Lett. 13 (2022) 9573. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.2c02641>  
 [12] M. Uemoto et al., J. Appl. Phys. 132 (2022) 95301. <https://doi.org/10.1063/5.0101703>  
 [13] S. Sakamoto et al., Phys. Rev. B 106 (2022) 174410. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.174410>  
 [14] H. Naganuma et al., Phys. Rev. Mater. 7 (2023) 14405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.7.014405>

### 実施ビームタイム

2019年度(後期のみ): 14日@16A, 14.5日@7A  
 2020年度: 18.56日@16A, 16.83日@7A  
 2021年度: 24.33日@16A, 35.5日@7A  
 2022年度(前期のみ): 9.33日@16A, 14日@7A

### 終了後の展開

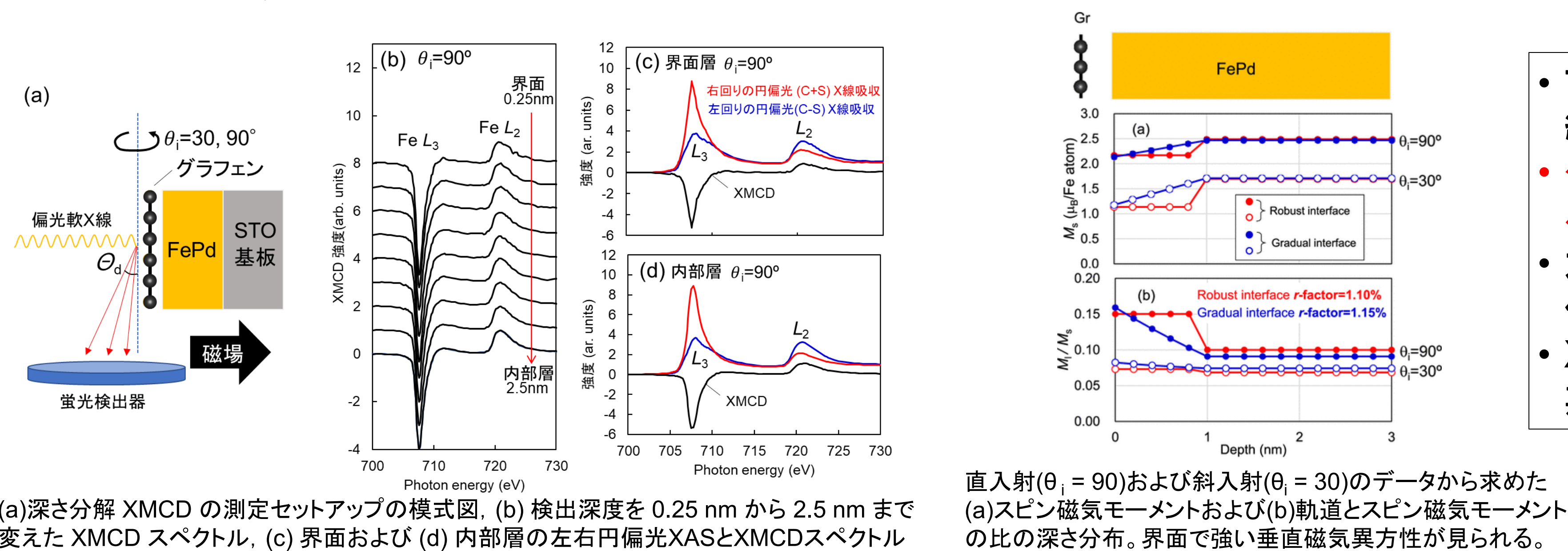
2022G516	永沼 博	不揮発性磁気メモリのための異種結晶界面にあらわれる界面垂直磁気異方性の新規探索
2022G552	雨宮 健太	蛍光収量深さ分解XMCDを用いた酸化物/Co薄膜における電界による保磁力変化機構の解明
2022G553	雨宮 健太	軟X線領域の時間-深さ同時分解XASによる金属酸化反応のその場観察
2022G568	柳原 英人	電流がFe薄膜中のねじれたスピン構造に及ぼす効果に関する研究
2022G571	鈴木 真粒子	深さ分解X線磁気円二色性による界面磁気異方性の直接観察
2023G129	坂本 祥哉	極薄絶縁層を挿入したFe/MgO界面の磁気異方性と電子構造の磁気円二色性による研究

### 成果例 1: グラフェン/FePd合金界面における垂直磁気異方性

プレスリリース: ファンデルワールス力による“つよく”・“しなやか”な新しい結合  
 - 強磁性トンネル接合素子の構成材料としてグラフェン二次元物質/規則合金の異種結晶界面に期待 -

<https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2022/03/pr20220302.pdf>

“Unveiling chemisorbed crystallographically heterogeneous graphene/L1<sub>0</sub>-FePd interface with robust and anisotropic orbital-moment”, H. Naganuma, M. Nishijima, H. Adachi, M. Uemoto, H. Shinya, S. Yasui, H. Morioka, A. Hirata, F. Godel, M.-B. Martin, B. Dlubak, P. Seneor, and K. Amemiya, ACS Nano (2022). <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c09843>

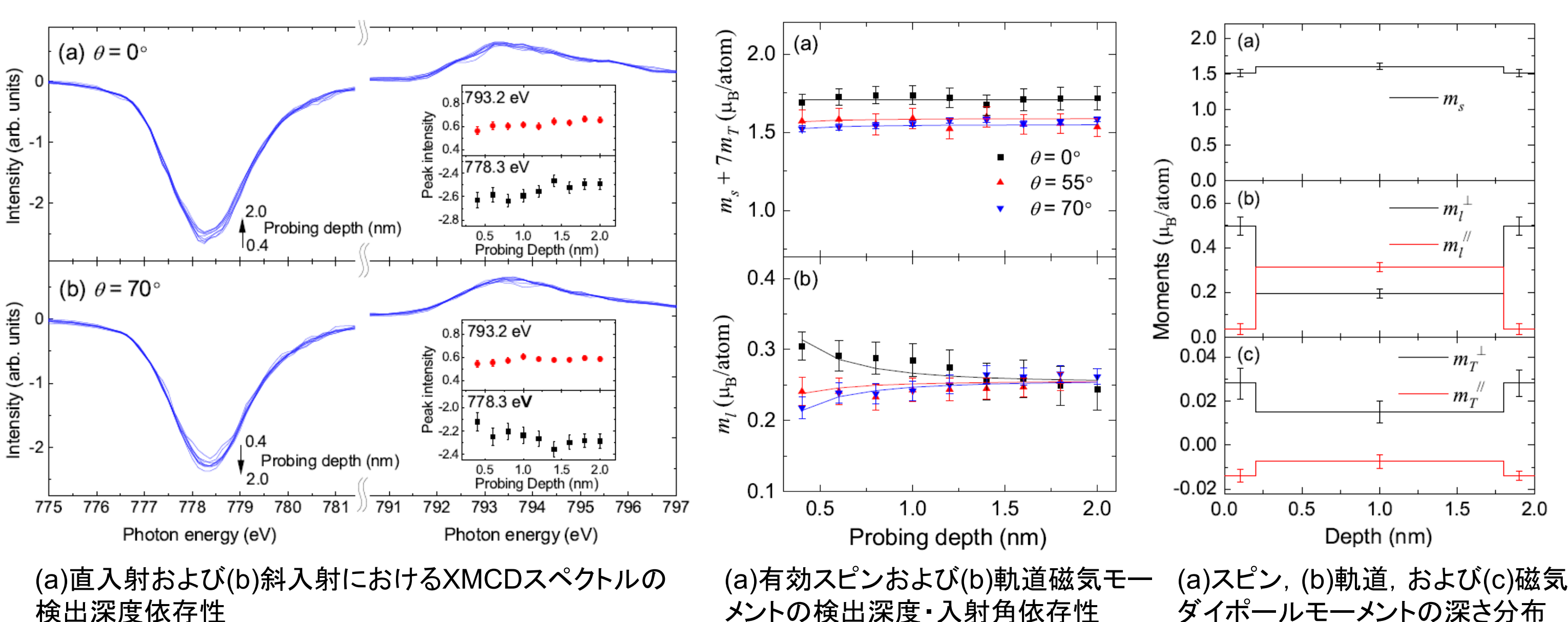


- ファンデルワールス力により、異種結晶界面が“つよく”・“しなやか”に結合することを発見
- グラフェンとL1<sub>0</sub>-FePd規則合金の界面に垂直磁気異方性が誘起されることを発見
- 六方晶グラフェンと正方晶L1<sub>0</sub>-FePd規則合金の異種結晶界面の原子位置を理論と実験の両方により正確に決定
- X nm世代のMRAMに向けたグラフェン/L1<sub>0</sub>-FePd規則合金記録層に期待

### 成果例 2: Au/Co/Au界面における磁気モーメントの異方性の決定

“Determination of Anisotropy in Magnetic Moments at the Interface of Au/Co/Au Thin Film without Thickness-Dependent Experiment”, K. Amemiya and K. Sakata, Phys. Rev. B 106 (2022) 134424. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.134424>

- 12 kOeの磁場中での深さ分解XMCD測定により、界面におけるスピン磁気モーメント、軌道磁気モーメント、磁気ダイポールモーメントの異方性を、厚さを変えた実験を行うことなく決定
- Auとの界面においてCoの軌道磁気モーメントが垂直方向に大きいのに対し、内部層では逆の傾向にあることを明らかに



### 成果例 3: V/Fe/MgOにおける界面磁性の観察

“Electron Correlation Enhances Orbital Polarization at a Ferromagnetic Metal/Insulator Interface: Depth-Resolved X-ray Magnetic Circular Dichroism and First-Principles Study”, S. Sakamoto et al., ACS Appl. Electron. Mater. 4 (2022) 1794. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c00049>

- V/Fe/MgOに対して、界面におけるスピン磁気モーメント、軌道磁気モーメントを観察
- MgOとの界面においてFeの軌道磁気モーメントが大幅に増大していることを明らかに

