

プログラム名：無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現

PM名：佐橋政司

プロジェクト名：電圧トルク MRAM プロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 2 7 年 度

研究開発課題名：

磁性体界面における電圧効果の放射光 X 線磁気分光による研究

研究開発機関名：

公益財団法人 高輝度光科学研究センター

研究開発責任者

鈴木 基寛

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

電圧印加状態におけるX線分光のその場観察手法の開発に関して、多素子蛍光X線検出器システムの導入を行い、蛍光X線信号の検出効率を既存装置の10倍以上に向上する。FePt膜試料に対するPtのXMCD測定から、スペクトルの印加電圧の依存性を取得し、電圧による変化の有無と変化量を評価する。有意な変化が観測された場合には、電圧による軌道磁気モーメントの変化量を見積もり、電圧磁気効果によるマクロスコピックな磁気特性変化との相関関係を明らかにする。また、軟X線によるFe, Co系の電圧磁気効果の分光測定を開始する。

### (1) 大面積・多素子蛍光X線検出器による高感度測定システムの構築

- ・ 硬X線用多素子蛍光X線検出器を設置した高感度計測システムの構築
- ・ 軟X線用多素子蛍光X線検出器の調達およびビームライン装置への設置による高感度計測システムの構築

### (2) Pt、およびFe, Co系試料の電圧印加状態でのXMCD測定

- ・ FePt膜試料に対するPtのXMCD測定から、スペクトルの印加電圧の依存性を取得し、電圧による変化の有無と変化量を評価する。
- ・ Fe膜試料に対するFeのXASおよびXMCD測定を行い、電圧効果の有無と変化量を評価する。

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

#### (1) 大面積・多素子蛍光X線検出器による高感度測定システムの構築

蛍光X線信号の検出効率を既存装置の10倍以上に向上するという性能目標達成のため、カスタムメイドの大面積4素子シリコンドリフト(SDD)検出器を導入した。検出器本体は順調に稼働し、仕様通りの性能が得られた。一方、パルス信号処理回路については、パルス分離デジタル処理機能を搭載した最新機種を調達したが、納品が遅れ年度末となってしまった。そのため、パルス処理回路は代替品を用いざるを得ずシステムとしての最高性能を得るには至らなかった。そのような状況であるが、既存検出器システムと比較して6倍の検出効率の向上を実現した。正規のパルス処理回路を用いることで、平成28年度の早い段階に目標の検出効率を達成できる見込みである。また、軟X線測定用として超高真空仕様の大型4素子SDDを導入した。XMCD測定用の真空チェンバーへの取り付け、および試験測定を行い正常に動作することを確認した。

#### (2) Pt、およびFe, Co系試料の電圧印加状態でのXMCD測定

阪大の鈴木義茂教授(電圧トルクMRAMプロジェクト プロジェクトリーダー)グループらとの共同研究として、FePt膜試料に対するXMCD測定を実施した。試料に直流電圧を印加した状態でのXMCDのその場観察を行い、PtのXMCDスペクトルの電圧による有意な変化を観測することに成功した。Ptの磁気双極子モーメント(スピン密度分布の異方性)が電圧によって変化するという結果が得られ、電圧磁気異方性効果の新しいメカニズムが示唆された。同試料に対する電圧印加条件でのEXAFS測定も行い、電圧印加条件でのPt原子間距離の変化の有無を見積もった。また、軟X線分光

による Fe の電圧効果を測定し、酸化還元反応を伴わない状況でも電圧磁気異方性効果が起こることを初めて実証した。以上のように、当初の目標以上に早い進捗を得ており、重要な結果が得られている。

## 2-2 成果

### (1) 大面積・多素子蛍光 X 線検出器による高感度測定システムの構築

硬 X 線測定用の大面積・多素子検出器を導入したシステムを構築し、試験測定を行った。既存検出器と比較して、検出効率で 6 倍、最大計数率も 6 倍の 1.4 Mcps に向上し、エネルギー分解能は 25% 向上した。FePt L1<sub>0</sub> (Fe, Pt それぞれ二原子層) の試料に対する、新旧検出器での XMCD 測定結果を図 1 に示す。新検出器システムによって、XMCD スペクトルの統計精度が格段に向上した。同じ計測時間での統計精度は 2.6 倍に向上し、また同じ統計精度を得るための計測時間は 1/6 に短縮できる。本検出器システムの順調な稼働を受け、平成 27 年度後期からの実験に使用している。また、軟 X 線用の多素子検出器の導入も順調に進んでおり、図 2 のように測定用真空槽に取り付け、試験測定を行った。

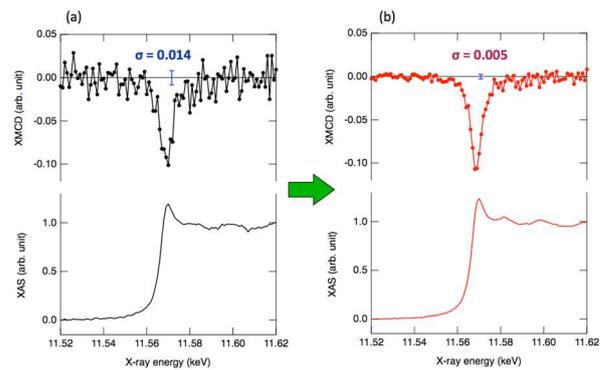


図 1 新旧計測システムによる FePt 超薄膜の XMCD スペクトルの統計精度の比較。(a) 既存検出器、(b) 新規導入した大面積・多素子検出器による結果。

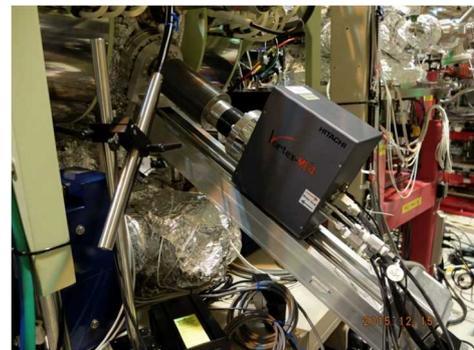


図 2 XMCD 測定真空槽に導入した軟 X 線多素子大面積検出器。

(2) Pt、および Fe, Co 系試料の電圧印加状態での XMCD 測定  
阪大の鈴木教授のグループおよび産総研の野崎グループの協力により分子線エピタキシー法を用いて FePt 原子制御膜を用意し、外部電圧を印加しながら放射光 XMCD 分光による評価を行った。実験に用いたのは Fe と Pt それぞれ 2 原子層ずつから構成される超薄膜の L1<sub>0</sub>-FePt であり、電圧を印加する絶縁層との界面は Pt で終端されている。その結果、±200 V の印加電圧に対する Pt の L 吸収端での XMCD スペクトルの電圧依存性に対する有意な差を得ることができた。磁気光学総和則による解析から、Pt 5d 電子の軌道磁気モーメントおよび有効スピン磁気モーメントの値を決定した。さらに、膜面に対して垂直、面内方向の XMCD スペクトルの方向依存性から、磁気双極子モーメントを評価した。その結果、従来、磁気異方性の主な要因として指摘されてきた軌道磁気モーメントの変化は測定誤差内で変化せず、磁気双極子モーメントが有意な変化をしていることが明らかになった (図

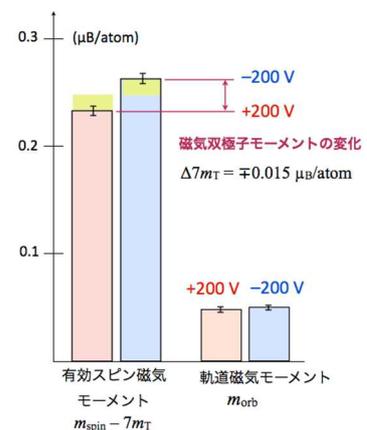


図 3 FePt 膜の Pt の磁気モーメントの電圧による変化。

3)。これは、従来の Bruno モデルで考慮されていないスピントリッパによる異方的交換相互作用が電圧磁気効果の起源である可能性を示唆する、新しい結果である。

同様の試料に対する電圧印加条件下での EXAFS 測定を行い、Pt-Pt の原子間距離の正負の電圧に対する変化を見積もった。その結果、電圧による界面での原子位置変位が 0.1 Å 以下のオーダーであることを明らかにした。

軟 X 線分光測定に関して、Fe/MgO 系での XAS の電圧効果を測定し、XAS の変化が測定限界以下であることから、酸化還元反応を伴わない状況でも電圧磁気異方性効果が起こることを初めて実証した [Miwa et al., Appl. Phys. Lett. 107, 162402 (2015)]。

### 2-3 新たな課題など

X 線照射時の試料の温度上昇がどの程度かを評価する必要がある。もしも数 10°C 以上の温度上昇が起こっているとすると、試料の磁気特性が変化してしまい、真の電圧効果との区別ができなくなる。また、温度上昇によって熱活性型の界面化学反応を誘起する恐れもある。今後、計画している X 線を集光したナノビームによる測定では、単位面積当たりの X 線強度が高いために局所的に試料温度が上がり、温度の影響がより顕著になる可能性がある。なお、本件は平成 27 年度下半期成果報告会で指摘いただいた事項である。

### 3. アウトリーチ活動報告

平成 27 年度に、研究開発として行ったアウトリーチ活動はない。