

論文内容の要旨

論文題目：放射光光電子顕微鏡による

強磁性／反強磁性交換結合系の静的および動的磁気特性の研究

(Study of static and dynamic properties of ferromagnetic/antiferromagnetic exchange coupled system by synchrotron radiation photoemission electron microscopy)

氏名： 新井 邦明

反強磁性層の上に強磁性層を成長させた系（交換結合系）では、強磁性層単体と比べて、より大きな磁気異方性および保磁力をもつ現象が生じる。交換結合系の磁気物性は、強磁性／反強磁性界面で生じる強磁性スピンと反強磁性スピンの磁氣的相互作用（交換結合）、および反強磁性磁区構造に依存することが知られている。しかしながら、界面は埋もれているため、詳細な観測が困難である。そのため、強磁性スピンと反強磁性スピンのコリニア結合であるという報告や、スピン間のなす角度が 90 度である報告がなされており、交換結合状態について統一的理解が得られていない。また、反強磁性体はマクロな磁化をもたないため、微小領域の磁区構造を観察する実験手法は限られている。そのため、磁壁内スピン構造、磁壁幅、磁壁エネルギーについて異なる報告がなされており、統一的理解が得られていない。したがって、交換結合系の磁気物性について明らかになっていないのが現状である。

そこで、本研究では、高い空間分解能と元素分解能をもつ放射光光電子顕微鏡(PEEM)を用いて、反強磁性磁壁内スピン構造、反強磁性磁区構造内のスピン方向と内部エネルギーの関係および交換結合状態を明らかにすることを目的とした。

ネール温度が室温より高いと、測定時において温度変化に伴う試料位置のドリフトがないため、磁区構造をより明瞭に観察できると期待される。また、コリニアなスピン配列をもつ反強磁性体では、1 方向のスピンをもつ強磁性体の磁区構造と比較しやすく理解しやす

い。これらの条件を満たすのは、典型的な反強磁性体である NiO である。そのため、本研究の測定試料として NiO を選んだ。交換結合系の強磁性体には、基板 NiO との格子定数の差が小さい Fe 薄膜を用いた。強磁性体と反強磁性体の格子定数の差が小さい場合、格子定数の差が交換結合に及ぼす影響が小さく、純粋にスピン間の相互作用を議論できると期待される。

交換結合系の磁気構造は、基板である反強磁性体の磁区構造に依存する。上述したように、反強磁性体の磁壁に関する知見は少ないため、最初に反強磁性磁区構造を観察し、磁区および磁区内のスピン方向を決定する必要がある。

実験では、PEEM、X 線磁気線二色性(XMLD)、及び X 線線二色性(XLD)を組み合わせた手法を用いて、NiO の磁区構造を観察した。反強磁性スピンに由来する磁区 (S ドメイン) と結晶歪に由来する磁区 (T ドメイン) は、それぞれ Ni L_2 吸収端の XMLD と O K 吸収端の XLD により観測した。その結果、S ドメインの XMLD は、これまでに説明されてきた 1 原子モデルではなく、結晶対称性と原子間相互作用を考慮した理論計算で説明できることを初めて明らかにした。この結果は、1 原子モデルでは始状態と終状態の波動関数が球対称であるのに対し、NiO では結晶対称性を反映した原子間相互作用により 3d 電子の波動関数は局在しかつ異方性をもつことに起因する。これにより、高い空間分解能 (100 nm 以下) で NiO のスピン方向の 3 次元的決定が可能になった。

一方、T ドメインの XLD 強度を測定した結果、XLD は偏光ベクトルと T ドメイン内の磁化容易面のなす角度に依存し、双極子終状態で O $2p$ 軌道の異方性は、T ドメイン内の磁化容易面と平行に存在することを新たに見出した。この T ドメインの XLD の規則性を見出したことにより、XLD を用いて直接 T ドメインをアサインすることが可能になり、T と S ドメインの区別が容易になった。これらの知見は、複雑な反強磁性磁区構造を理解する上で有効であり、結晶歪に由来する磁区をもつ他の反強磁性酸化物 (例えば CoO) の磁区構造を理解する上でも重要である。

さらに、XLD と XMLD を用い T と S ドメインを区別して観察し、磁壁内の XMLD 強度と結晶対称性を考慮した理論計算を比較することにより、全ての種類の磁壁内スピン構造を決定した。T ドメイン境界に形成する磁壁(T-wall)は、異なる T ドメインの磁化容易面{111}の境界に相当するため、スピン方向は磁化容易面に存在せず、磁気弾性の影響を受けていた。一方、S ドメイン境界に形成する磁壁 (S-wall) では、{111}面内の結晶磁気異方性の影響を受けて、スピン方向は、磁化容易面に存在していた。さらに、全ての種類の磁壁幅は 100 nm のオーダーであること、および<100>方向と<110>方向の T ドメイン間境界に形成する磁壁(T-wall)の磁壁エネルギーに差異があることを初めて明らかにした。これらの結果から、T ドメイン構造の形成は、磁気弾性効果による異方性に由来すると考えられる。また、1 つの T ドメイン内における S ドメイン構造内では、磁化容易面{111}面内の結晶磁気異方性エネルギーは、{111}面外の結晶磁気異方性エネルギーよりもはるかに小さいことが影響し、スピンは磁化容易面{111}内を容易に回転する。

本研究で得られた反強磁性磁壁内のスピン方向、磁壁幅、磁壁エネルギーの差異に関する知見は、反強磁性体の磁気物性を理解する上で重要である。

NiO の磁区構造について得られた知見をもとに、交換結合系 Fe/NiO(100)の強磁性、界面、および反強磁性磁区構造の関係を調べた。強磁性および界面の磁区構造は、それぞれ Fe L_3 吸収端および Ni L_3 吸収端の X 線磁気円二色性(XMCD)を用いて観察した。その結果、Fe の磁区構造は基板 NiO の磁気構造の対称性を反映して形成し、Fe 薄膜は $\langle 100 \rangle$ と $\langle 110 \rangle$ 方向の2種類の磁化容易軸をもつことが新たに分かった。Fe 薄膜の2種類の磁化容易軸は、NiO(100)表面とのなす角度が2種類の反強磁性 Ni スピン方向に対応する。さらに界面では Fe スピンと Ni スピンがコリニア結合をしていた。これらの結果は、基板 NiO の磁区構造との交換結合により Fe 薄膜の磁気異方性が生じることを意味しており、交換結合系における強磁性薄膜の磁気異方性を理解する上で重要である。

なお、付録 A、B に、磁区構造の動的特性に関して重要である、微小強磁性体のスピンドYNAMIXの研究内容を記した。