

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 山本 駿玄

本論文は、「基板上における低次元スピン系の構築と微視的評価」と題し、Ag(111)基板上に物理吸着させた酸素分子を量子スピンと見なし、走査トンネル顕微鏡 (STM) による分子配列および局所磁気特性の評価機能を駆使することによって所望の低次元量子スピン系を構築・評価する量子シミュレータシステムの実現を目指した研究についてまとめたものである。具体的には、局所磁気特性の評価手法としてのスピン偏極 STM 装置を開発し、同基板上での個々のナノサイズ Co アイランド構造の磁化曲線計測を実現するとともに、アイランド間での磁気特性の違いがアイランドに内在する積層欠陥に誘起された磁気異方性の違いとして説明されることについて論述している。また、同基板上での低温蒸着により物理吸着した単層酸素分子薄膜を構築し、その分子配列の歪みから酸素分子が吸着層においてもスピンを保持し磁気秩序を形成していることを見出した点についても詳述している。

本論文は全5章から構成されており、第1章は「序論」、第2章は「実験手法」、第3章は「ナノサイズ Co アイランドの局所磁化曲線測定」、第4章は「物理吸着 O₂ 格子におけるスピン状態の微視的評価」、第5章は「強磁場 LT-STM における物理吸着の実現に向けた装置開発」、第6章は「総括」となっている。

第1章は序論であり、背景となる低次元量子スピン系の量子シミュレータに関する説明や、本研究における主題の一つである酸素分子を量子スピンと見なしてその物性を評価したこれまでの研究例について述べている。

第2章には、本論文における主たる実験手法である STM やスピン偏極 STM に関して、その基礎原理・理論や応用例について述べている。

第3章は、「ナノサイズ Co アイランドの局所磁化曲線測定」と題し、Ag(111)基板上の形成された大きさ 10~20nm、厚さ 5~8 原子層の Co アイランド構造のスピン偏極 STM による磁気特性の測定結果について述べている。ここでは、印加磁場を変えながらスピン偏極したトンネル電流の伝導度測定により、5つのアイランド構造での磁化曲線が得られたことを報告している。5つのアイランド構造では保持力や磁化曲線の形状に若干の差異が見られたものの、アイランド構造の厚さや大きさの違いでは説明できないことを示し、さらに、第一原理計算による結晶磁気異方性の評価や形状磁気異方性の見積りから、これらの磁気特性の違いは、Co 薄膜等でも報告される積層欠陥の導入により結晶磁気異方性が変化したことに由来するものであることが結論された。

第4章の「物理吸着 O₂ 格子におけるスピン状態の微視的評価」では、Ag(111)基板上で物理吸着した単層酸素分子層の分子配列・スピン状態に関する研究について述べている。まずは、低温吸着させた酸素分子層が 40K でほぼ脱離することから、同系が物理吸着層で

あることを確認し、同分子が有するスピンの吸着層においても保持されている可能性について言及している。続いて、同層内の酸素分子の配列がファンデルワールス的相互作用から予想される二等辺三角形の配列から若干ずれており、不等辺三角形の配列となっていることを実験的に示している。グラファイトなど他の基板でも同様の歪んだ配列構造が報告されており、基板からの影響の可能性が否定されることから、分子の有するスピンの影響ではないかとの推論に至っている。

このことを検証するために、ファンデルワールス相互作用・四極子相互作用・スピン間の反強磁性相互作用を考慮したモンテカルロ・シミュレーションを行っている。反強磁性相互作用を考慮しない場合には二等辺三角形の配列が予想通り安定構造となるのに対し、反強磁性相互作用を含めることで、ほぼ観察結果と同程度の歪みを持つ不等辺三角形の配列が安定となることが示された。このことから、物理吸着した単層酸素分子層ではスピン間相互作用がその配列に重要な寄与を及ぼしていることを示すとともに、物理吸着した酸素分子がそのスピンを保持し、二次元分子層を形成する際には反強磁性的な秩序構造を形成していると結論している。

なお、このシミュレーションにおける反強磁性相互作用の表式として、従来用いられてきた分子中心間距離に依存する式では実験結果をうまく説明できず、相互作用の物理的描像により即した分子間の最近接原子間距離に依存する式を新たに導入することで、実験結果が良く説明できる点にも言及している。

第5章の「強磁場 LT-STM における物理吸着の実現に向けた装置開発」では、強磁場印加可能な STM 装置において、酸素分子を低温蒸着させる機構の開発とその現状について述べている。

第6章は総括であり、これまで述べてきた研究結果についてまとめている。

以上をまとめると、本論文では、酸素分子を量子スピンとした量子シミュレータ実現に向けて、スピン偏極 STM 装置の開発とそれをを用いた Ag(111) 基板上的のナノサイズ Co アイランド構造の磁気特性評価を行うとともに、STM による精緻な構造評価から同基板上に物理吸着した単層酸素分子薄膜におけるスピンや磁気秩序の存在を明らかにしている。いずれも STM の物性科学への新たな展望を拓く成果として、物理工学への寄与は非常に大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。