

## 研究課題別研究評価

### 1. 研究課題名 金属原子による低次元微細構造の形成と発現する物性の制御

### 2. 研究者名 南任 真史

### 3. 研究のねらい：

金属の構造を原子スケールで低次元化すると、電荷やスピンの密度波の出現、スピンと電荷の分離、コンダクタンスの量子化、バンドの平坦化による強磁性の出現など、従来の三次元結晶の金属では観測されない様々な現象が発現することが知られている。こうした現象の理論的研究は進んでいるが、実際の観測例は多くない。本研究では、原子スケールの低次元構造を色々な金属元素について自由に創り出す技術確立し、人工的に形成した低次元構造の物性を精密かつ系統的に測定することでより多くの知見を得ることを目的とした。低次元系に特有の物理現象についての理解を深めることにより、最終的にはその構造制御によって発現する物性を制御することを目標とした。

### 4. 研究結果

- 1) 酸化物基板上における金属一次元構造の形成：金属の一次元構造を形成する基板として、ペロブスカイト型酸化物の  $\text{SrTiO}_3$  を用いることにした。蒸着した金属原子を拡散・トラップさせて一次的に配列させるため、ステップが平行に走る構造が再現性良く得られる表面処理方法を確立し、得られた表面の上に金属の微量蒸着を試みた。摩擦顕微鏡を用いた観察から、サブミクロンスケールでは金属が一次元構造を形成していることが確認された。
- 2) 酸化物基板の表面構造の原子スケールでの評価・制御 酸化物基板上での一次元構造形成を原子スケールにスケールダウンするため、 $\text{SrTiO}_3$  の表面構造を原子スケールで制御するべく、表面処理の条件を変化させながら STM と LEED で観察した。その結果、 $\text{SrTiO}_3$  の表面においては、様々な超構造が共存し、ナノメータスケールの領域で入り交じっていることがわかった。この超構造の原因が、表面に吸着する Sr 原子であると考えられたことから、より単純な組成の  $\text{TiO}_2$  を用いて同様の実験を行ったところ、均質で理想とする表面に近い構造が得られた。
- 3) 金属基板上における金属一次元構造の形成 基板として s 電子を有する Au を用い、(111)面の微傾斜面である(455)面の上に d 電子を持つ Fe の一次元構造の形成を試みた。ステップが等間隔で平行に走る構造の上に Fe を微量蒸着した結果、蒸着量を制御することにより原子一列の配列から二次元的なものまで、自由に幅を変化させながら一次元構造を形成することに成功した。
- 4) 金属基板上に形成した金属一次元構造の角度分解型光電子分光測定  $\text{Au}(788)$  表面上に形成した Fe の一次元構造について、その電子構造を探る目的で角度分解型光電子分光を行った。その結果、原子数列程度の幅の一次元構造では、Fe の 3d 電子が強い一次元性を有していること、また、これらの系が絶縁体的で且つ非磁性であることが示唆された。一方、蒸着量を増やしていくと、強磁性金属であるバルクの Fe の電子状態に近づいていくことがわかった。

- 5) 極低温強磁場印加型超高真空 STM 装置の開発 形成した一次元金属の構造・電子状態・スピン状態を直接観察する目的で、室温から0.3Kの温度範囲で、最大8Tまでの磁場を印加し、 $10^{-11}$ Torr 台の真空度の中で観察可能なSTM装置を、ハードウェア・ソフトウェア・エレクトロニクス全て自作しながら開発を進めてきた。現時点では、4.2K、8T、 $10^{-11}$ Torr の条件を実現出来るところまで装置を組み上げて、問題点の洗い出しとその解決を急いでいる。

## 5. 自己評価

1) 2)は、本研究を実現する上で重要な鍵と考えられる、金属一次元構造を形成するステージとして理想的な固体表面の探索を行った研究結果である。一次元構造の金属原子と基板との電子的な相互作用を小さくする目的で、扱いやすい Si ではなく、敢えて酸化物を基板に選んだ。最初にした複酸化物の  $\text{SrTiO}_3$  では、酸素の欠損だけでなく二種類ある金属元素の組成のずれなど、本質的に不均一性を含んだ系であったため、原子スケールで表面構造を十分に制御することが難しく、目的としている金属一次元構造の形成まで到達出来なかった。よりシンプルな系である  $\text{TiO}_2$  を用いた場合には、比較的良好な結果が得られており、酸素の欠損さえうまく制御することが出来れば、理想的な表面が得られ、その上での金属一次元構造の形成も達成出来ると考えている。一度、酸化物の基板で実験がうまくいくようになれば、これまでに誰も観察したことのない新しい結果が得られるものと期待している。実験の進め方としては、 $\text{SrTiO}_3$  でかなり苦戦して時間をとられてしまったので、初めから  $\text{TiO}_2$  のようなシンプルな系を試すべきであったと反省している。

3)は酸化物基板で苦戦していたため、とりあえず本研究で考えている金属の一次元構造の形成法が実際に機能するかどうかを確認する意味で、金属基板の上に遷移金属の一次元構造を形成した結果である。金属の上に金属を一次元的に並べても、基板との相互作用のため一次元的な電子状態は実現出来ないと考え、磁性に的を絞って実験を行うことにした。磁性を担うd電子を持つ遷移金属を、s電子系の金属の上で一次元的に配列させ、d電子に関して低次元化することで、バルクの金属強磁性体と異なる性質を引き出そうと試みた訳である。金属の一次元構造の形成は非常に制御性良く行うことができ、本研究の方法が実際に十分機能するという感触を得ることが出来た。

Au の上に形成した Fe の一次元構造が非常に均質且つ周期的であったため、マクロな測定法でも十分な情報が得られると考え、その電子構造を評価するために行ったのが4)の実験である。得られた結果は予想していた以上に面白いものであった。基板として用いた Au の微傾斜面が擬一次元的電子状態になっており、その上に配列させた Fe の一次元構造も一次元的な電子構造を有していることがわかった。観察されたバント構造からは、この系が非磁性で絶縁体的な性質を持つことが示唆され、これは、低次元化により強磁性金属がまったく異なる性質を示すようになった例として興味深い。この結果により、金属を低次元化することでまったく異なる性質を引き出すという本研究の狙いが、実際に可能であることを実証出来たと考えている。今後、基板や蒸着金属の組み合わせを変えることで、更なる発展的な展開が期待出来る。

5)は、本研究で最もエネルギーを費やした内容であるが、残念ながら装置を実験に投入す

るに至らなかった。一通りの組み立てはほぼ一年半で達成したため、比較的楽観的な見通しを立てていたが、その後予想した以上に多くの問題が見つかり、その解決に追われている間に研究期間の終了を迎えてしまった。問題の殆どはテクニカルなマイナートラブルであり、その解決は容易だったが、多くがハードウェアの問題だったため、装置の性格上その修正に長い時間を要した。後から考えると、装置のテストの段取りが悪く、かなり無駄な時間を費やしてしまったと反省している。現在、唯一抱えていた比較的シリアスな問題もかなり改善されてきたため、装置の実験への投入はかなり近づいていると考えている。

全体を通して、計画した研究内容に関して前進はしているものの、大きな成果を得るところまで一歩及ばなかった。計画に正面から取り組んで努力した結果ではあるが、三年間の研究期間中に成果を出すという意味で、計画の立て方や状況判断が甘く、研究方針の臨機応変さが欠けていたと反省している。計画した研究そのものは、スピードは遅いが基本的には前進しており、目的を達成出来るという感触は得られているので、今後の研究の展開を急ぎたい。

## 6. 研究総括の見解

金属原子の低次元構造の物性を精密に測定すること、ならびに極低温、強磁場、超高真空などの極限条件で作動するトンネル顕微鏡の開発、が研究テーマであった。前者については、チタン酸ストロンチウムや金の表面を利用して、鉄原子の一次元、二次元構造を作成した。最も多くのエネルギーを費やした後者の研究では、ユニークな特性を目指す新装置の組み立て、テストが難航し、研究終了時期までに動作の見通しが得られた段階に留まったので、実際のサンプルについて実験を行って新規データを得るまでには至らなかった。レベルの高い目標であっただけにもう一歩であった。

## 7. 論文など:

S. Shiraki, M. Nantoh, M. Wakatsuchi and M. Kawai, 'Friction contrast and its inversion observed on metal deposited  $\text{SrTiO}_3(100)$  surfaces ', submitted to J. Appl. Phys.

他、投稿準備中 3報。