

超 Tbit/inch² 磁気記録媒体評価を可能にする 単分子磁石走査型トンネル顕微鏡法の研究開発 (102107004)

Research and development of scanning tunneling microscopy with a single-molecule magnet for evaluation of magnetic recording media with a recording density over Tbit/inch²

研究代表者

戸川欣彦 大阪府立大学 21世紀科学研究機構ナノ科学・材料研究センター

Yoshihiko Togawa Osaka Prefecture University Nanoscience and Nanotechnology Research Center

研究分担者

西野智昭[†]

Tomoaki Nishino

[†]大阪府立大学 21世紀科学研究機構ナノ科学・材料研究センター

[†]Osaka Prefecture University Nanoscience and Nanotechnology Research Center

研究期間 平成 22 年度～平成 24 年度

概要

本研究開発では、超高密度磁気記録媒体の評価を可能とする単分子磁石走査型トンネル顕微鏡 (STM) を研究開発することを目標とする。そのため、次の 3 つの研究開発項目、①単分子磁石探針の作製、②極微小磁性体試料の作製と特性評価、③単分子磁石 STM の開発 を設定し、単分子磁石 STM 装置の研究開発を進める。開発する単分子磁石 STM を用い、作製する評価用極微小磁性体試料の表面の磁化状態を可視化し、原子レベルでの空間分解能の達成を目指す。将来的に、単分子磁石 STM を超高密度の磁気記録媒体の実材料における磁化状態の評価へ展開し、超 Tbit/inch² の磁気記録媒体の解析が可能な単分子磁石 STM の開発を達成することを最終的な目標とする。

1. まえがき

情報通信機器が世界中に普及する現代社会において、情報通信機器が消費する総電力量は膨大なものとなっている。情報通信技術 (ICT) の革新によりその省エネルギー化を図ることは早急に取り組むべき課題である。その中で、不揮発性を有する磁性体を用いた情報記録素子の記録密度を数 Tbit/inch² 級に向上する超高密度化技術は ICT における重要な研究課題として現在盛んに研究開発が行われている。超高密度化の目標とされる 5 Tbit/inch² を達成するには、単純計算で 1 bit の大きさがおよそ 100 nm² (例えば、5 nm × 20 nm の異方的形状) の磁気記録媒体が必要となる。そのため、高保持力を有する磁気記録媒体材料の研究開発が盛んに進められている。

研究開発の現場では、材料開発と同時に開発材料の磁気特性評価の重要性が増しており、極めて微小な磁気記録媒体の磁化状態を簡易に大気中で解析する計測技術が切望されている。本研究チームはこれまで探針に単分子を用いる STM (分子探針 STM) を独自に開発してきた。分子探針 STM を用い、大気中において DNA の識別やカーボンナノチューブ内の五員環欠陥の実空間観察に成功するなど研究実績を有する。本研究開発では、本研究チームが培ってきた分子探針 STM を磁気イメージングに展開する。単分子磁石を探針に用い、大気中で作動し、原子スケールの超高空間分解能を有する磁気応答型分子探針 STM (単分子磁石 STM) を開発することを目標とする。将来的に、単分子磁石 STM を磁気記録媒体の開発における基盤解析評価技術として活用することを目指す。

2. 研究開発内容及び成果

本研究開発では、研究開発項目①単分子磁石探針の作製、②極微小磁性体試料の作製と特性評価、③単分子磁石 STM の開発 を設定し、単分子磁石 STM の研究開発に取り組んだ。

項目①、②においては、単分子磁石の合成、単分子磁石

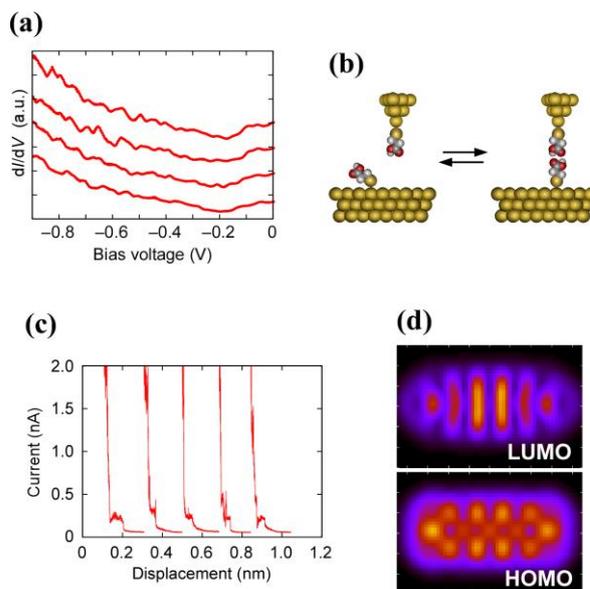


図 1. 単分子磁石 STM の開発。(a)大気中にて計測した Au(111) の dI/dV スペクトル。(b)単一分子-単一分子間電子移動の計測模式図。(c)3-カルボキシプロパンチオール探針、試料の I-z 曲線。(d)CO 探針を用いて観察されたペンタセン分子の STM シミュレーション像。

探針の作製、極微小磁性体試料の作製 および、単分子磁石の吸着膜の評価などの試料の特性評価 などを達成している。項目③の単分子磁石 STM の開発においては、まず微分コンダクタンス (dI/dV) の高精度計測法の開発に取り組んだ。従来、大気中において STM を用いた dI/dV 測定は、再現性悪く、信頼性に欠けるものと見なされてきた。環境や探針の不安定に起因するノイズが、微分スペクトルである dI/dV においては強く強調されるためと考えられる。そこで、商用の大気中 STM にロックインアンプ

を組み込み、高い信号雑音比にて dI/dV スペクトルを計測するシステムを開発した。既知の種々非磁性材料の dI/dV 測定を行い、その特性解析を行い、本システムによって、大気中においても、超高真空中と同様に、高再現性、高精度を実現できることを実証した (図 1(a))。

続いて、開発した微分コンダクタンス (dI/dV) 計測システムを基に、表面の磁化状態の可視化に注力した精密計測に取り組んだ。磁性体の dI/dV マッピングによる磁化状態の可視化に向けた最終準備実験として、Au(111)、および高配向焼結グラファイト (HOPG) の、広いバイアス電圧領域における dI/dV 測定を行った。Au(111)に対しては比較的再現性良くスペクトルが得られた (図 2(a))。一方、HOPG では、最表面の剝離によって清浄表面が容易に得られるにも関わらず、帰属することのできないピークが多数様々なバイアス電圧において見られた (図 2(b))。同様の傾向は、本研究開発の最終ターゲットである磁性体においても得られている。また、アルゴン等、不活性雰囲気下における測定によっても再現性良く dI/dV スペクトルを取得することはできなかった。結論として、現段階で dI/dV 信号から磁化状態に依存する成分を明確に得ることはできていない。これらの実験結果の解析から、大気中の (dI/dV) 計測システムの開発が本研究課題を達成するために必須の研究課題であることが明確となった。大気中における (dI/dV) 精密計測はこれまで世界中で達成されておらず、重要かつ挑戦的な課題であることが判明した。今後も、他の金属表面、または多数の報告がある porphyrin 等有機分子の吸着状態における dI/dV 測定を行うことによって問題点を抽出し、大気中の (dI/dV) 計測システムの研究開発に精力的に取り組む。

実施計画に加えて、“電子線小角散乱法を用いた磁性体磁気構造の解析方法”や“分子探針を介したトンネル過程のシミュレーション技術 (図 1(d))”などの新しい研究手法の開発を行った。また、本研究開発をきっかけに“らせん磁性体におけるらせん磁気秩序の実証”や“分子架橋系における電子輸送計測法 (図 1(b,c))”の研究に成功し、研究開発の新しい展開を切り開いた。これらは、今後、本研究開発が最終目標とする超 Tbit/inch² の磁気記録媒体の磁化状態解析を行う上で、極めて有用な基本情報として積極的に活用されると考えられる。なお、上記の研究開発成果は下記の論文等において発表している。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本プロジェクトにおける研究開発を遂行することにより、単分子磁石 STM 開発を達成するために必須となる基盤技術“大気中の (dI/dV) 計測システム”を洗い出した。これは今後の重要な研究開発方針であり、これを達成すべく研究を継続する。研究計画に加えて、“分子探針を介したトンネル過程のシミュレーション技術”や“小角電子線散乱法”の開発に成功した、また、本研究開発をきっかけとして“らせん磁性体におけるらせん磁気秩序の実証”や“分子架橋系における電子輸送計測法”の開発に成功した。これらの成果は新たな研究領域として広がりつつあり、今後も中核を担うべく研究開発を継続する。

本研究開発プロジェクトが目標とする単分子磁石 STM 研究開発のアイデアは、TEM を用いた微小磁性体やスピントロニクスの研究を専門とする代表研究者と分子探針 STM の開発を専門とする研究分担者が、両者の専門性を生かした異分野融合を目指すことにより創生した。今後も共同研究を継続し、将来的に情報通信技術(ICT)を大きく革新させるに貢献することを目指す。

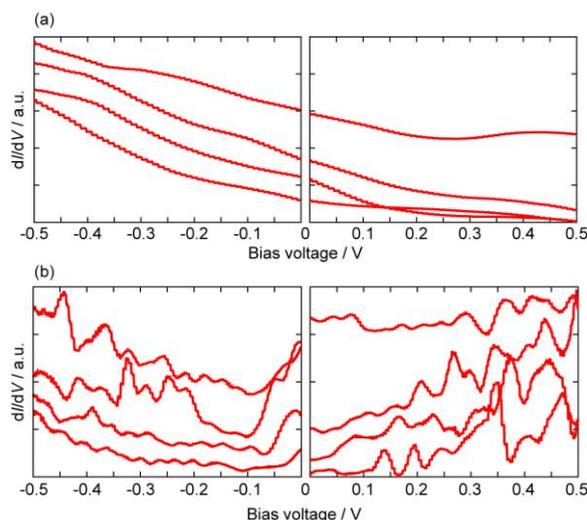


図 2. (a) Au(111)、(b) HOPG 表面の dI/dV スペクトル

4. むすび

超 Tbit/inch² 級の磁気記録媒体の研究開発を推進するため、単分子磁石を探針に用いる走査型トンネル顕微鏡 (STM) の研究開発を行った。現段階で磁化状態に依存する成分を明確に得ることはできていないが、実験結果の詳細な解析により、“大気中の (dI/dV) 精密計測システムの開発”が本研究課題を達成するために必須の研究課題であることを明確にした。これは世界中でこれまで達成されておらず、重要かつ挑戦的な研究開発課題である。今後も継続して大気中の (dI/dV) 計測システムの研究開発に精力的に取り組む、単分子磁石 STM の開発を達成する予定である。

【誌上发表リスト】

- [1] M. Kuroda, T. Nishino, “Preparation of tips coated with poly(dimethylsiloxane) for scanning tunneling microscopy in aqueous solutions”, Rev. Sci. Instrum. Vol. 82, 063707 (5 pages) (2011). (2011/6/29) (Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology にて選出掲載)
- [2] Y. Togawa, “Small-angle electron scattering”, Microscopy Vol.62, ppS75-S86 (2013/5/13)
- [3] S. Kanata, T. Nishino, H. Aoki, “Effect of Aqueous Environment on Monolayer of Tetrairon(III) Single Molecule Magnet”, J. Electrochem. Soc. Vol. 159, ppH772-H776 (2012/8/29)

【申請特許リスト】

- [1] 戸川欣彦、原田研、森茂生、「電子顕微鏡、および回折像観察方法」、日本、平成 23 年 3 月 1 8 日

【受賞リスト】

- [1] 西野智昭、2011 年度日本分析化学会奨励賞、“分子探針を用いた走査型トンネル顕微鏡による単分子分析法の開発”、2011/9/15
- [2] 戸川欣彦、文部科学大臣表彰 平成 24 年度「科学技術分野の若手科学者賞」、「電子顕微鏡法による量子凝縮体の観察とその運動制御の研究」、2012/4/17
- [3] 西野智昭、文部科学大臣表彰 平成 25 年度「科学技術分野の若手科学者賞」、「分子探針を用いた走査トンネル顕微鏡による単分子分析の研究」、2013/4/16

【報道掲載リスト】

- [1] “微小な磁気秩序を証明”、日経産業新聞、2012/2/28
- [2] “New Twist in Chiral Magnets”、Physics 5, 28 (2012)、2012/3/5