

報道関係者各位

## 金属ナノ微粒子における長いスピン緩和時間を観測

### 1. 発表者・著者

田中 雅明 (東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授)

大矢 忍 (東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 准教授)

ファム ナム ハイ (東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 特任助教)

### 2. 発表概要

GaAs 半導体マトリックス中に分散する六方晶の結晶構造をもつ強磁性金属 MnAs ナノ微粒子 (直径 ~ 5 nm) を含む単電子スピントランジスタ構造 (注1) を作製し、微粒子における極めて長いスピン緩和時間 (10  $\mu$ s) ( $\mu$ s=マイクロ秒) (注2) を観測した。この値はこれまで報告された金属ナノ微粒子のスピン緩和時間として最も長く、最近報告された Co 微粒子のスピン緩和時間より 2 桁 (約 100 倍)、バルク金属と比べると 7 桁 (約 10,000,000 倍) も長い。この成果は、強磁性微粒子の超高密度スピンメモリや再構成可能なスピントランジスタ等、次世代のスピントロニクス・デバイス (注3) への応用につながると期待される。

### 3. 発表内容

東京大学工学系研究科の研究論文が英国科学誌「Nature Nanotechnology」に掲載されました

東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻の田中雅明教授、大矢忍准教授、ファムナムハイ特任助教の研究グループは、六方晶 MnAs 強磁性微粒子を含む単電子スピントランジスタ構造を作製し、金属ナノ微粒子において世界でもっとも長いスピン緩和時間(10  $\mu$ s)を観測しました。本研究は、80年代に理論的に予測された金属微粒子の量子サイズ効果によるスピン緩和の抑制(スピン緩和時間の増大、すなわち電子のスピン状態が長い時間にわたって保たれること)を実験的に明らかにし、ナノスケール材料の優位性を示した成果です。この長いスピン緩和時間は強磁性微粒子の超高密度スピンメモリや再構成可能なスピントランジスタ、スピンを利用した新しいデバイスへの応用が期待できます。本研究は、東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻の田中・大矢研究室において、主にベトナム出身のファム ナム ハイ博士によりグローバル COE 特任研究員(一部は博士論文研究)として実験研究が行われたものです。本研究成果は英国科学誌「Nature Nanotechnology (ネイチャー ナノテクノロジー)」(2010年07月4日 Online)に掲載されました。

## 研究の背景

金属のナノ微粒子において、量子サイズ効果によるエネルギーの離散化が生じるため、スピン緩和が強く抑えられることが予測されている[参考文献 1,2]。そのため、金属ナノ微粒子においては、バルクや薄膜よりもはるかに長いスピン緩和時間が期待できる。粒子サイズが数ナノメートルと小さい時、量子サイズ効果によって伝導電子のエネルギー準位が離散化されている。そのため、スピンフリップ散乱が起こる確率がバルクや薄膜よりも減るため、長いスピン緩和時間が得られる。スピン緩和時間が長いということは、電子のスピン状態が長い時間にわたって保たれることを意味するものである。よって、長いスピン時間を得ることは、電子のスピン状態を利用したデバイスへの応用上、きわめて重要である。

これまで、強磁性金属微粒子のスピン緩和時間の測定は容易ではなかった。半導体の場合は、数 100 nm のサイズでも量子効果が現れるが、金属の場合、サイズが 10 nm 以下でなければ、量子効果は顕著に現れない。また、半導体の量子ドットの場合、光のポンプ・プローブ法などの確立したスピン緩和時間の測定技術があるが、金属においては、光による手法が使えない。2004 年に東北大学のグループは、強磁性金属のコバルト (Co) 微粒子 (直径 ~ 2.5 nm) においてスピン依存伝導特性の測定を行い、スピン緩和時間が 150 ns (150 ナノ秒) と見積もった[参考文献 3]。しかし、この研究で用いられた構造では酸化物の絶縁体を使用したため、微粒子の界面などの問題があり、それより長いスピン緩和時間が得られていなかった。

### 参考文献

- [1] A. Kawabata, J. Phys. Soc. Jpn. 29 (1970) 902.
- [2] J. Buttet *et al.*, Phys. Rev. B 26 (1982) 2414.
- [3] K. Yakushiji, *et al.*, Nat. Mater. 4 (2004) 57.

## 研究成果 - 長いスピン緩和時間の観測

分子線エピタキシー法 (注 4) およびナノ加工技術により、単結晶 MnAs ソース電極 (5 nm) / GaAs (5 nm) / GaAs:MnAs 微粒子 (5 nm) / MnAs ドレイン電極 (5 nm) からなる単電子スピントランジスタ (Single electron spin transistor; SEST) 構造を作製した。図 a にその断面構造を示す。ここで、GaAs:MnAs とは GaAs 格子中に直径 5 nm 程度の六方晶 MnAs ナノ微粒子が埋め込まれた構造である。図 b に走査電子線顕微鏡による SEST の像 (上から見た図) を示す。ソース・ドレインのギャップが 25 nm で、粒子間隔とほぼ同じであるため、ギャップに 1 個の MnAs 微粒子が形成されていることが期待できる。実際に単電子伝導の測定ではクーロン階段のステップが注入した電子数の線形関数であるため、一個の MnAs 微粒子を介する伝導であることを確認した (図 c 中の挿入図)。

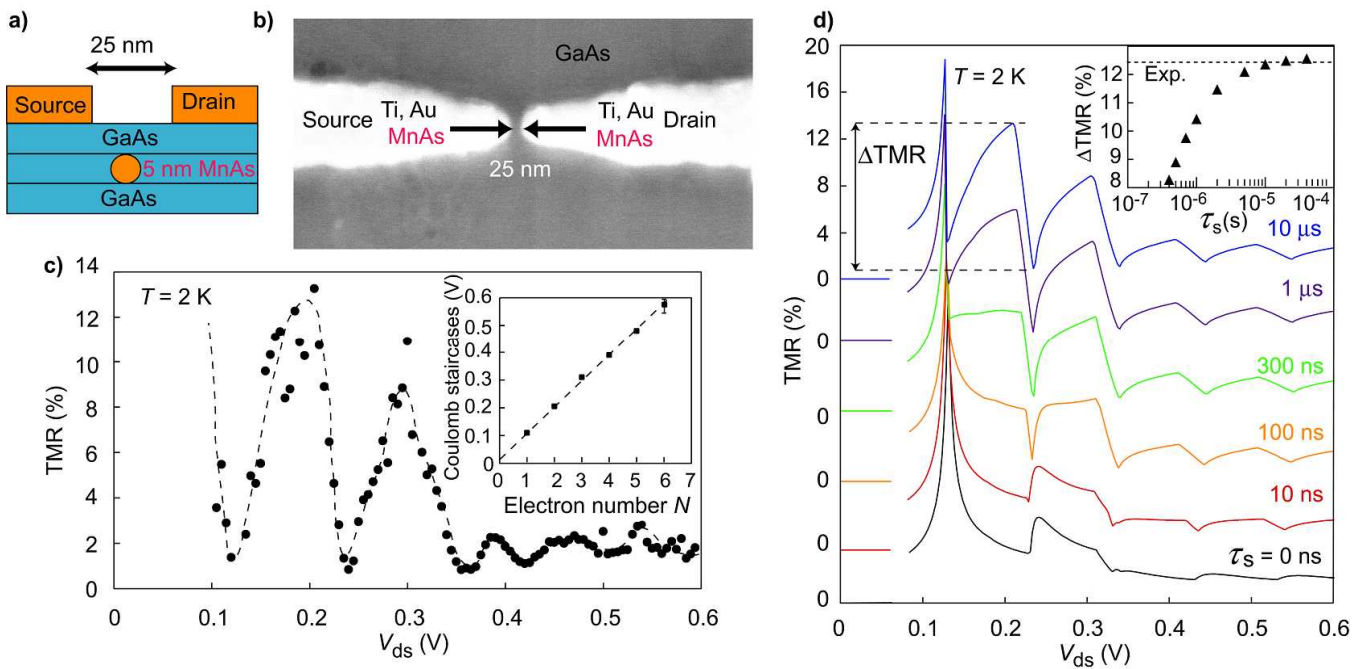


図 a. 単電子スピントランジスタの断面構造 b. 走査型電子顕微鏡により上から観測したデバイス構造 c. クーロン・ブロッケード効果によるトンネル磁気抵抗比 (TMR 比) の振動現象。挿入図はクーロン階段の注入電子数依存性。d. スピン蓄積を考慮したモデルによる TMR 振動の計算結果。挿入図は振動幅のスピンの緩和時間依存性。実験結果と理論計算のフィッティングにより、MnAs 微粒子中のスピンの緩和時間が  $10 \mu\text{s}$  であると見積もられる。

図 c にゼロ磁場と  $10 \text{ kG}$  の磁場を印加した際の抵抗の変化率 (トンネル磁気抵抗比; TMR 比) (注 5、6) のソース・ドレイン電圧依存性を示す。TMR 比が振動しているのは、クーロン・ブロッケード効果 (注 7) およびスピン蓄積現象 (注 8) による。この TMR 振動と理論計算 (図 d) と比較した結果、スピンの緩和時間が  $10 \mu\text{s}$  かそれ以上であることが分かった。

このような長いスピンの緩和時間を達成できたのは、1) 単結晶の微粒子と半導体的なトンネル障壁の使用、2) 微粒子表面酸化や不純物汚染がない良質な界面、3) MnAs 自体のスピン軌道相互作用が弱いこと、などによると考えられる。

### 本研究成果の意義

本研究は、1980 年代に理論的に予測された金属微粒子の量子サイズ効果によるスピンの緩和の抑制 (スピンの緩和時間の増大、すなわち電子のスピン状態が長い時間にわたって保たれること) を実験的に明らかにし、ナノスケール材料の優位性を示した成果です。スピンの緩和時間が  $10 \mu\text{s}$  かそれ以上であることは驚くべき長さであり、ここで明らかにされた長いスピンの緩和時間は、MnAs 強磁性微粒子中の電子のスピン状態が長い時間にわたって保たれることを意味するので、超高密度スピンメモリ、単電子スピントランジスタ、再構成可能な論理回路など、スピンを利用した新しいデバイスへの応用へ道を開くことが期待できる。

現在の情報通信技術を担う集積回路は電子の電荷を利用しているが、構成する半導

体デバイスのサイズはすでに数十ナノメートルの領域に達しており、微細化による高性能化の限界に近づきつつある。電子の電荷のみならずスピンを利用した新しい原理のデバイスが、次世代の主役になると期待されているが、そうしたスピントロニクスデバイスの実現に向けて重要なステップとなる成果である。

## 用語解説

### (注1) 電子スピンと単電子スピントランジスタ

電子が本来持っている自転のような性質。スピンを持つことで電子は各運動量と磁気モーメントを持つ小さな電磁石となっている。電子スピンは物質の磁性の源であり、スピンの状態には上向き(up spin)と下向き(down spin)という二つの状態がある。また、本研究で用いた単電子スピントランジスタは、東京大学田中研究室により以前に提案と解析がなされた強磁性体のソース・ドレインと強磁性微粒子を有するデバイスであり、1個の電子の伝導がそのスピンの向きによってトランジスタ特性に影響を与えることを利用して、原理的には再構成可能な論理回路に応用できることが示されている(Pham Nam Hai, S. Sugahara and M. Tanaka, "Reconfigurable Logic Gates Using Single Electron Spin Transistors", Jpn. J. Appl. Phys. 46, pp.6579-6585 (2007))。

### (注2) スピン緩和

電子や核のスピン偏極が減少して熱平衡状態へ緩和する現象(縦緩和) およびスピンのラモア歳差運動する過程でその位相を失う現象(横緩和)を表す。本研究では微粒子中に注入された電子のスピン状態が、ランダムな熱平衡状態に戻る縦緩和する過程を指す。スピン緩和時間とは、電子のスピン状態が、スピン偏極している状態(スピンのそろっている状態)からランダムな状態に戻るのに要する時間を意味する。

### (注3) スピントロニクス

電荷とスピンの自由度を用いることによって発現する、電気的、磁氣的、光学的な現象を応用する新技術。現在、トンネル磁気抵抗効果(TMR)素子を集積化した不揮発磁気メモリー、不揮発性および再構成可能な論理回路、半導体中のスピンの応用、スピンを利用した量子計算や量子情報処理技術などに関心が集まっている。

### (注4) 分子線エピタキシー法

超高真空において、材料がはいった坩堝を加熱することにより原子または分子をゆっくり基板の上に降らせて積層させ、単結晶の薄膜を成長させる結晶成長方法。1原子層または1分子層単位の膜厚制御性があり、さまざまな薄膜の作製に使われている。

### (注5) 磁気抵抗

物質に磁場をかけると電気抵抗が変化する現象。電気抵抗の変化率を磁気抵抗比という。現在ハードディスク用磁気ヘッドに使用されている巨大磁気抵抗効果(Giant

magnetoresistance, GMR)の発見は2007年のノーベル物理学賞の対象になった。強磁性トンネル接合における磁気抵抗はトンネル磁気抵抗効果(TMR)という。

(注6) 磁気トンネル接合(強磁性トンネル接合)

強磁性電極/トンネル障壁/強磁性電極からなる3層構造からなるトンネル接合。トンネル障壁の厚さは数ナノメートルと非常に薄いので、電子がトンネルによって伝導することができる。2つの強磁性電極の磁化状態(磁化が平行か反平行か)によって、数10%~数100%におよぶ大きな抵抗変化を示し、磁気センサーや不揮発性メモリに応用される。このような強磁性トンネル接合における磁気抵抗をトンネル磁気抵抗効果(Tunneling magnetoresistance, TMR)という

(注7) クーロン・ブロッケード効果

微粒子のサイズが非常に小さい時、粒子に入っている電子間のクーロン反発が無視できなくなる。そのため、ある閾値以上にバイアス電圧を印加しないと、次の電子が微粒子に入れなくなる現象をいう。その際、電流-電圧特性はステップ状になる。

(注8) スピン蓄積

強磁性電極から微粒子にスピン注入した場合、電子のスピン緩和時間が長い時、アップスピンとダウンスピンの電気化学ポテンシャルが異なる現象をいう。このスピン蓄積によって、TMR振動の様子変わる。従って、TMR振動の様子を測定することで、スピン蓄積、つまりスピン緩和時間を見積もることができる。

#### 4. 論文名・著者名

Nature Nanotechnology (2010年7月4日 Online (オンライン版で日本時間7月5日 午前3時)) に掲載されました

Pham Nam Hai, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka.

“Long spin-relaxation time in a single metal nanoparticle”

Nature Nanotechnology, published online on July 4, 2010 (DOI 10.1038/NNANO.2010.130.)

#### 5. 注意事項

特になし

#### 6. お問い合わせ先

田中 雅明

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授