

2026年4月3日  
帝京大学

## 最先端の半導体技術で量子コンピュータを読み出す新手法 ～スマートフォン・AI向けGAAトランジスタをシリコンスピン量子ビットに活用できる ことをシミュレーションで理論実証～

### <概要>

従来のコンピュータでは解くことが難しい問題を高速に解くことができる量子コンピュータは、次世代の計算機として注目されています。

量子コンピュータの基本単位である「量子ビット」は0と1の両方の状態を同時に持っており、この性質を応用した、「シリコンスピン量子ビット<sup>\*1</sup>」という方式があります。

この「シリコンスピン量子ビット」は、スマートフォンなどに使われる半導体（CMOS）技術と相性がよく、小型化・大量生産に向いているという長所があります。帝京大学理工学部データサイエンス学科教授 棚本哲史らの研究チームは、スマートフォンやAI向け半導体にすでに使われている最新のトランジスタ「GAAトランジスタ（Gate-All-Around transistor）<sup>\*2</sup>」を、「量子ビット」の状態を読み取るセンサーとして活用できることを、コンピュータシミュレーションによって理論的に示しました。この方法により、高価な特殊素子を使わずに、現在の半導体産業の製造プロセスをほぼそのまま利用して量子コンピュータの読み出し回路を実現できる可能性が示されました。量子コンピュータの低コスト化・大規模化への重要な一歩となる成果です。

### <ポイント>

- スマートフォンやPCに使われている最先端のGAAトランジスタが、量子コンピュータの量子ビットの状態を読み取れることをシミュレーションで実証しました。
- 量子ビットの電子スピン（↑か↓か）の違いを、電荷の分布の違いとしてとらえ、トランジスタに流れる電流の差として検出する新しいしくみを提案しました。
- 3次元デバイスシミュレーション（TCAD）と回路シミュレーション（SPICE）を組み合わせ、既存の半導体製造プロセスと互換性のある量子ビット読み出しが可能なことを示しました。

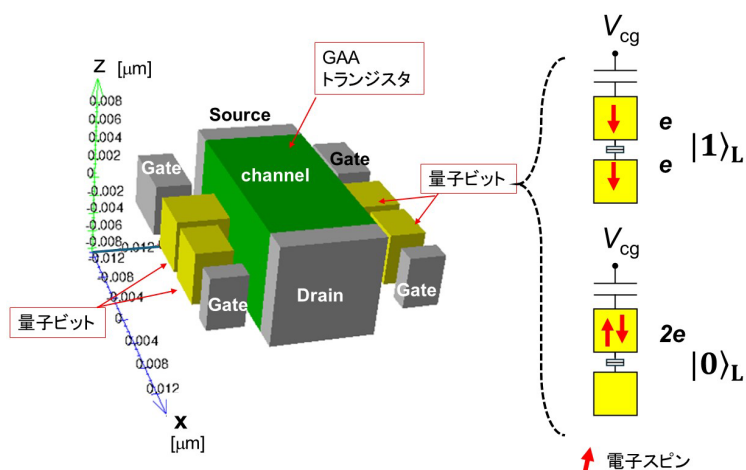


図1：（左図）提案したGAAトランジスタ（緑）と量子ビット（黄色）の3Dシミュレーションモデル。（右側）量子ビットは量子ドット（黄色）の中の電子のスピンの配置で決まる。スピンの配置により電荷eの分布が決まり、この電荷分布をGAAトランジスタが電界効果により検知する。これにより電子スピンの状態（量子ビットの状態）をトランジスタで検知することができる。

### <研究の背景>

量子コンピュータは、従来のコンピュータでは何百年もかかる計算を短時間で解ける可能性を持つ、次世代の計算機です。その実現に向けて、シリコン（ケイ素）という身近な素材を使った「スピン量子ビット」が世界中で注目されています。シリコンはスマートフォンや家電に使われている半導体と同じ材料で作れるため、既存の工場をそのまま使えるという大きなメリットがあります。しかし、量子ビットが「0」か「1」かを電氣的に読み取るセンサーには、通常の半導体製品とは異なる特殊な構造が必要で、製造が難しくコストがかかることが大きな課題でした。

## <研究の内容>

本研究では、GAA トランジスタに着目しました。GAA トランジスタは、スマートフォンやAI チップに使われ始め、今後主流となる超微細トランジスタであり、電荷に関する感度も高いため、量子ビットの状態を読み取るセンサーとしても使える可能性を、コンピュータシミュレーションによって示しました。

主な成果は以下の通りです：

- ・GAA トランジスタの中を流れる電流の量が、量子ビットが「0」か「1」かのスピン状態によって変わることを、精密な3次元コンピュータシミュレーションで確認
- ・量子ビットから出る非常に微弱な電気信号を、標準的な回路（センスアンプ）で検出・増幅できることを回路シミュレーションで確認
- ・今回提案した構造は、量子コンピュータが計算ミスを自動で修正する「量子誤り訂正」の仕組み（2次元表面符号）に対応できる設計になっており、将来の大規模な量子コンピュータへの応用が期待される。

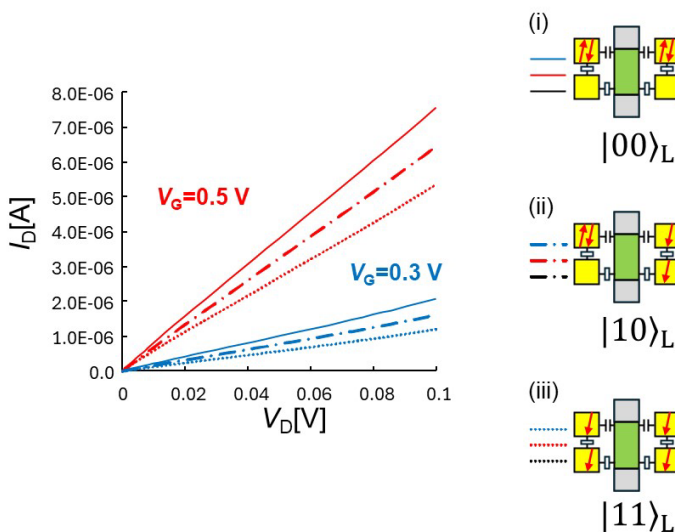


図2：（左図）GAA トランジスタの電流値 ( $I_D$ ) と電圧 ( $V_D$ ) の関係を示すシミュレーション結果。右図で示すのが量子ビットの状態。量子ビットの状態に応じて、電流値が異なる値をとることがわかる。 $V_G$  は GAA トランジスタのゲート電圧。

## <研究の成果の意義>

量子コンピュータを実際に作るうえで大きな壁となっていたのが、「量子ビットの状態を読み取るセンサーをどう作るか」という問題です。今回の研究は、世界中の工場で大規模生産がはじまっている GAA トランジスタがそのままセンサーになりうることをシミュレーションで示しました。これが実験でも確認されれば、量子コンピュータを作るために特殊な製造設備を新たに用意する必要がなくなり、製造コストの大幅な削減や、より多くの量子ビットを一つのチップに集積することへの道が開けます。

## <特記事項>

本研究は、Quantum Leap Flagship Program (MEXT Q-LEAP), JPMXS0118069228 及び国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けたプロジェクト「JPNP16007」の成果の一部に基づいています。

本研究成果は 2026 年 4 月 3 日 (金) (日本時間) に「IEEE Access, vol. 14, pp. 47525–47537, 2026」に掲載されました。

・タイトル : Device/circuit simulations of silicon spin qubits based on a gate-all-around transistor

・著者 : Tetsufumi Tanamoto (棚本哲史) and Keiji Ono (大野圭司)

・DOI : 10.1109/ACCESS.2026.3677383

・URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/11456013>

## <用語説明>

※1 ゲート・オール・アラウンド (GAA) トランジスタ :

トランジスタとは、電気の ON/OFF を切り替える半導体素子で、スマートフォンや PC の頭脳となるチップの中に数十億個以上が集積されています。電流の ON/OFF は「ゲート」と呼ばれる電極に電圧をかけることで制御します。従来のトランジスタでは、ゲート電極はチャンネル（電流が流れる細い通路）の上側にしか配置されていませんでした。これに対し「ゲート・オール・アラウンド (GAA)」とは、文字通り「チャンネルの周囲すべてをゲートで包む」構造です。四方からチャンネルを囲むことで、電流のコントロールが格段に精密になり、素子をより小さく・消費電力を低く作れます。

※2 スピン量子ビット :

「量子ビット」とは、量子コンピュータにおける情報の最小単位です。普通のコンピュータは「0 か 1 か」の二択（ビット）で情報を処理しますが、量子ビットは量子力学の「重ね合わせ」という性質によって、0 と 1 を同時に持つことができます。これにより、特定の問題を従来のコンピュータより飛躍的に高速に解くことができます。

「スピン量子ビット」は、電子がもつ「スピン」という性質を利用した量子ビットです。スピンとは、電子が自転するような固有の角運動量で、「上向き (↑)」と「下向き (↓)」の 2 つの状態を持ちます。これを「0」と「1」に対応させることで量子ビットとして使います。スピンは非常に小さな磁石のような性質を持ち、外部からの電氣的・磁氣的な操作で状態を制御できます。

### 【本件に関する問い合わせ先】

#### <研究に関すること>

帝京大学工学部データサイエンス学科 棚本哲史

TEL : 03-3964-1211

E-mail : tanamoto.tetsufumi.sn@teikyo-u.ac.jp

#### <報道に関すること>

帝京大学本部広報課

TEL : 03-3964-4162

E-mail : kouhou@teikyo-u.ac.jp