



丸文研究奨励賞 受賞者

深見 俊輔
東北大学 電気通信研究所
教授

トンネル磁気抵抗素子を用いた 確率論的コンピューターの原理実証

「量子」を使わず「量子」に迫る、Poor man's Q-bitで因数分解

研究の背景

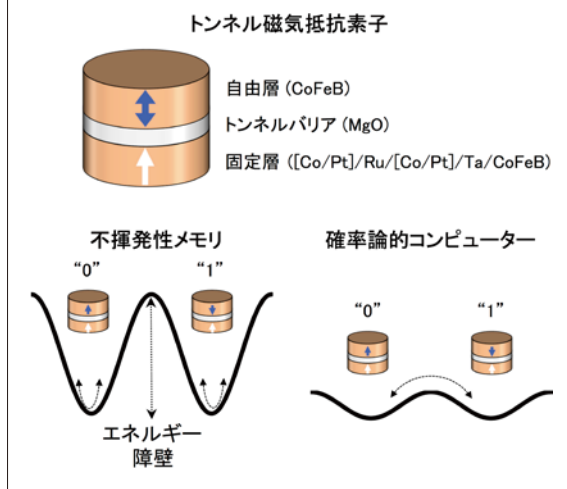
量子力学の原理を用いて演算を行う量子コンピューターは、古典コンピューターが苦手とする組み合わせ最適化問題などの高度な問題を効率的に処理できると期待され、活発な研究が行われている。古典コンピューターが情報を0と1のビット列で表して逐次的に演算を行うのに対して、量子コンピューターはビット内での0と1の重ね合わせ状態とビット間での状態のもつれ合いを利用して並列に演算を行う。

リチャード・ファインマンは1981年に行った講演で、量子コンピューターの可能性に言及したことがよく知られているが、彼は同じ講演の中で量子コンピューターとは似て異なる別の計算原理に基づくコンピューターの可能性にも言及している[1]。それが本研究の主題である確率論的コンピューターである。量子コンピューターでは「量子ビット(Qビット)」が計算を行う基本ユニットとなるのに

対して、確率論的コンピューターでは0と1の間で状態が時間的に揺らぎ、その滞在確率が外部入力によって制御可能な「確率ビット(Pビット)」が用いられる。

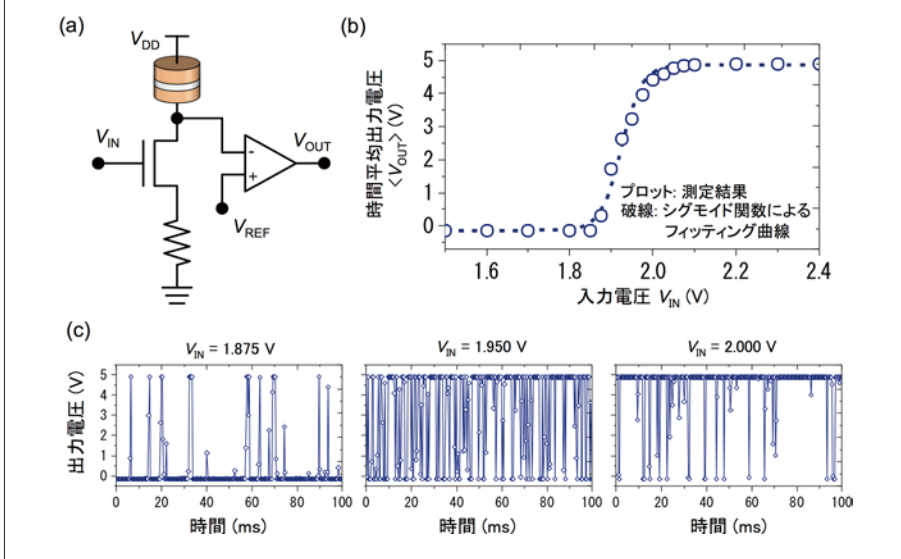
近年、このPビットの実現方法として、トンネル磁気抵抗素子を利用することがPurdue大学のグループから提案された[2]。トンネル磁気抵抗素子は、自由層と固定層の2つの強磁性層が薄い絶縁体からなるトンネルバリアを挟んだ構造を有し、自由層の磁化方向でデジタル情報を表すことで不揮発性スピメモリが実現できる。不揮発性メモリとして用いる場合には二つの磁化方向は熱擾乱エネルギーと比べて十分に高いエネルギー障壁で隔てられている必要があるのに対して、Pビットではこのエネルギー障壁を意図的に低減することで2状態間の確率

図1 不揮発性メモリ向けおよび確率論的コンピューター向けトンネル磁気抵抗素子の概念図



的な揺らぎ(超常磁性)を促進する(図1)。重ね合わせやもつれ合いなどの量子効果を使うことなくQビットに類似した機能を実現でき、Poor man's Q-bitと呼べるものである。

図2 Pビットのユニット回路図(a), および基本動作の測定結果(b), (c)

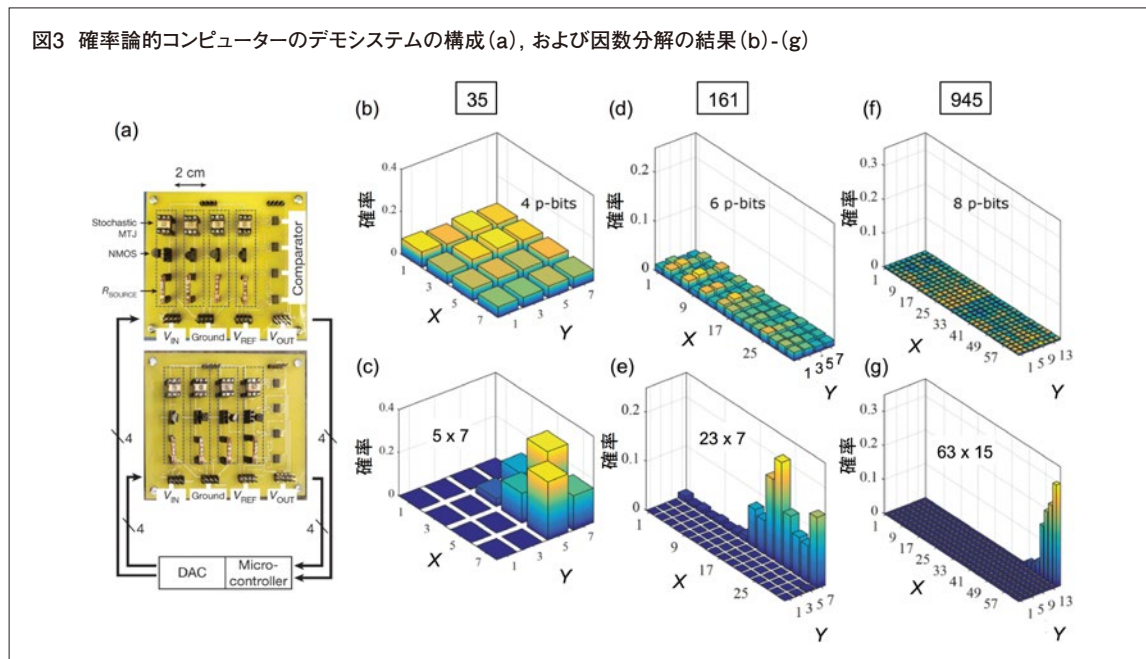


研究の成果

本研究は、トンネル磁気抵抗素子を用いて、ファインマンが提唱した確率論的コンピューターの原理実証を行ったものである。初めに、超常磁性を示すトンネル磁気抵抗素子を、これまで筆者らが培ってきた不揮発性メモリ技術をベースにして作製し、次いでそれを用いたPビットを実現した。さらにそのPビットを複数連結させて確率論的コンピューターのデモシステムを構築し、古典コンピューターが苦手とする問題の典型例である因数分解を、組み合わせ最適化問題のアルゴリズムを用いて解けることを実証した[3]。

図1には本研究で用いたトンネル磁気抵

図3 確率論的コンピューターのデモシステムの構成 (a), および因数分解の結果 (b)-(g)



抗素子の膜構成が示されている。自由層にはCoFeB合金を、トンネルバリアにはMgOを用いている。これは現行の不揮発性スピンメモリで用いられているものとはほぼ同じであるが、我々はCoFeB自由層の膜厚をわずかに厚くすることによってエネルギー障壁を低減し、ミリ秒オーダーでの揺らぎを実現できることを見出した。

図2(a)にはPビットのユニット回路の構成[4]が示されている。一つのトンネル磁気抵抗素子と、トランジスタ、比較器などから構成される。なおトンネル磁気抵抗素子の直径は60 nmである。図2(b)は作製したPビットへの入力電圧を変化させたときの出力電圧の応答の時間平均が、図2(c)には、3つの入力電圧での出力電圧の時間的な揺らぎの測定結果が示されている。入力電圧の大きさに応じて、低電圧と高電圧を出力している時間の割合が変化しており、その時間平均はシグモイド関数でよくフィットできている。この振る舞いはニューラルネットワークにおけるストカスティックニューロンの基本特性であり、確率論的コンピューターの実現に不可欠なものである。

続いてこのPビットを接続して確率論的コンピューターのデモシステムを構築した。図3(a)はそのブロック図とPビット部分の写真である。計8個のPビットがマイクロコントローラーとデジタルアナログコンバーター(DAC)で接続されており、それぞれのPビットの時々刻々と変化する状態に応じて、系の「エネルギー」が下がるような信号が他の

Pビットに随時伝達されるように設計されている。ここでこの系の「エネルギー」 E は与えられた問題で決まるものであり、計算科学ではコスト関数とも表現される。本研究では因数分解のコスト関数を $E = (XY - F)^2$ とした。 F は因数分解したい整数であり、 X , Y は求めたい因数である。 $XY = F$ の時にエネルギー(コスト関数)が最小となる形になっている。

図3(b)-(g)は因数分解の実験結果であり、(b)と(c)、(d)と(e)、(f)と(g)はそれぞれ35, 161, 945を4ビット、6ビット、8ビットで因数分解した際のものである。また(b), (d), (f)はビット間で相互作用を与えていない場合であり、(c), (e), (g)はコスト関数から導出される相互作用を与えた場合である。相互作用を与えた場合に、それぞれの場合の因数である7と5、23と7、63と15が最も高い確率で観測されており、正しく因数分解できていることが確認できる[3]。

将来の展望

今回原理実証を行ったトンネル磁気抵抗素子による確率論的コンピューターは、量子

コンピューターの一つである量子アニーリングマシンと多くの共通点を有するが、①室温動作が可能、②Gbクラスの成熟した不揮発性磁気メモリ技術に立脚しており大規模化の見通しが良い、③ビット間の相互作用を電氣的に実現できるので冗長なビットが不要であり、また多体相互作用もそのまま導入できる、などの利点がある。このことからニューノーマル時代にますます需要が高まると予測されるエッジでの最適化問題の処理、機械学習、限られた不確実な情報からの原因の推定、ワクチンや薬の開発などに有用となることが期待される。

謝辞

本研究成果は東北大学電気通信研究所の大野英男教授(現 総長)、博士課程学生のW. A. Borders氏、Purdue大学のS. Datta教授、K. Y. Camsari博士(現 UC Santa Barbara 助教)らと共同で行ったものであり、また同研究所附属ナノスピントロニクス研究室のメンバーにご助力いただきました。この場を借りて、関係する全ての皆様に深く御礼申し上げます。

References(参考文献)

- [1] R. P. Feynman, Int. J. Theor. Phys. 21, 467-488 (1982).
- [2] K. Y. Camsari, R. Faria, B. M. Sutton, S. Datta, Phys. Rev. X 7, 031014 (2017).
- [3] W. A. Borders, A. Z. Pervaiz, S. Fukami, K. Camsari, H. Ohno, and S. Datta, Nature 573, 390-393 (2019).
- [4] K. Y. Camsari, S. Salahuddin and S. Datta, IEEE Electr. Dev. Lett. 38, 1767-1770 (2017).