

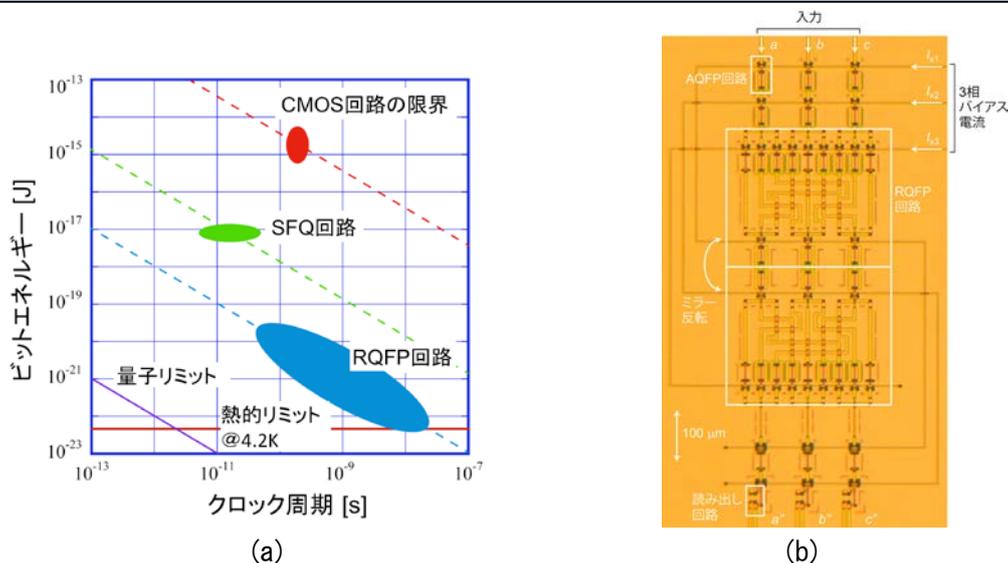
〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

世界初！新型超伝導回路で超低電力集積回路を実現

—スーパーコンピュータの消費電力ゼロへの挑戦—

横浜国立大学大学院工学研究院吉川信行教授と竹内尚輝日本学術振興会特別研究員（現在独立行政法人情報通信研究機構所属）は、コンピュータなどのデジタル計算の基本となる論理演算における消費エネルギーを限りなくゼロに近い値に低減できる新型超伝導回路の原理実証に、世界で初めて成功した。本新型回路を用いれば原理上消費エネルギーの限界値は無くなり、スーパーコンピュータやデータセンタなどの高性能情報機器の消費電力を従来に比べ格段に小さくすることができる。今回の新型超伝導回路は、単一磁束量子を情報担体とする量子磁束パラメトロンを組み合わせることで可逆的に動作させることで演算における情報のエントロピーの変化を伴わない様にした。これにより、従来から熱力学的な限界として知られるエネルギー限界値を下回るゼロに近い値のエネルギーでの演算を可能としている。今回は実験により新型回路の動作を検証し、計算により消費電力に限界が無いことを示した。また、論理演算に必要な全ての演算回路の動作実証に成功し、大規模集積回路への応用を可能とした。

この技術の詳細は、電子ジャーナル Scientific Reports で 2014 年 9 月 15 日に発表される。なお、本研究は科学研究費補助金基盤研究 S(課題番号 26220904)の支援のもとに実施された。



可逆的量子磁束パラメトロン(RQFP)のビットエネルギーとクロック周期の関係(a)と、顕微鏡写真(b)。可逆的量子磁束パラメトロンは超伝導材料であるニオブで作製され4.2Kの温度で動作させた。RQFP回路の構成要素は3入力3出力であり、デジタル情報は入力と出力との間で可逆的に双方向に伝搬できる。

本件に関するお問い合わせ先：横浜国立大学大学院工学研究院 吉川信行
TEL: 045-339-4259 Fax: 045-338-1157 E-mail: nyoshi@ynu.ac.jp

新型超伝導回路で超低電力集積回路を実現
—スーパーコンピュータの消費電力ゼロへの挑戦—

【研究背景】

将来のエクサスケール級（京コンピュータの 100 倍）を超える高性能コンピュータの実現のためには、エネルギー効率の高い論理演算回路の実現が必要です。論理演算回路のエネルギー効率において、最も重要な性能指標は 1 ビットの計算あたりの消費エネルギーです。古くからこの最小エネルギーに関して研究がなされてきましたが、理論的検討によれば 1 ビットの計算に必要な最小エネルギーは熱雑音エネルギー程度と予想され、Landauer 限界と呼ばれています。従来はこの最小エネルギーより遥かに大きなエネルギーで計算が行なわれていたため、応用上は消費エネルギーの限界を議論する必要はありませんでした。しなしながら、社会的に情報機器の低消費エネルギー化が望まれる中で、この問題を理解し、この限界を超える論理演算回路の研究開発が重要になっています。

【研究内容】

我々は、高速性が特徴の量子磁束パラメトロンと呼ばれる超伝導回路をゆっくりと可逆的に動かすことで、Landauer 限界を超える低エネルギー演算を行なうことができる可逆的量子磁束パラメトロン(RQFP)を提案し、世界で初めてその動作実証に成功しました。図 1 に RQFP 回路の構成を示します。RQFP 回路は、図 1 (a)の断熱型磁束量子パラメトロン(AQFP)を構成要素とし、3つのデジタル信号入力端子(a, b, c)と3つのデジタル信号出力端子(x, y, z)を持ちます。3つの端子から入力された信号に対して論理演算が行なわれ、3つの出力端子から信号が出力されます。本回路は、任意のデジタル信号入力に対する出力信号をそのまま出力端子から入力すると、元のデジタル信号が入力端子に出力され

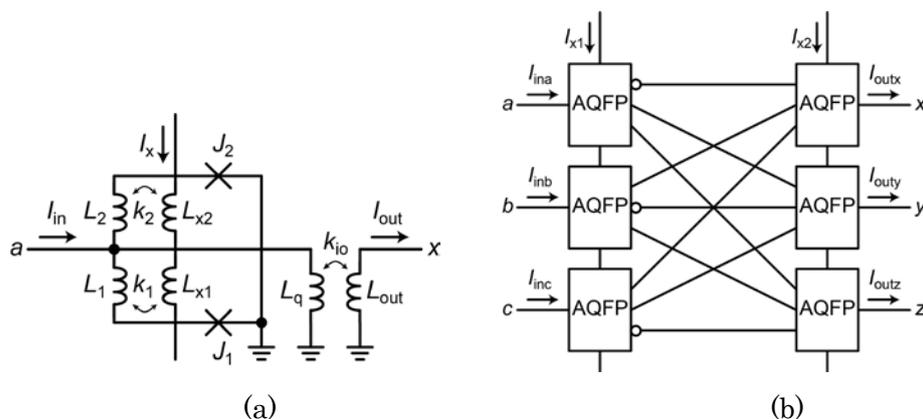


図 1 可逆的量子磁束パラメトロン(RQFP)の構成。(a) 構成要素である断熱型量子磁束パラメトロン(AQFP)。(b) AQFP によって構成された RQFP 回路。図中の×印はジョセフソン素子を表す。

るとい可逆的動作を行なうことができます。したがって、入力端子から出力端子に、あるいは出力端子から入力端子に双方向の論理演算が可能です。このような可逆回路は、原理的に無限小のエネルギーでの論理演算が可能です。

今回我々は、**RQFP** 回路を提案・設計し、独立行政法人産業技術総合研究所のニオブ集積回路プロセスを用いて製作しました。図2に試作した **RQFP** 回路の顕微鏡写真を示します。写真の回路は **RQFP** 回路2段から構成され、そのうち1段は物理的に入出力が反転されています。我々はこの回路において、**RQFP** 回路での論理演算が可逆的に行なわれることを実験的に示しました。また、数値シミュレーションにより **RQFP** 回路の論理演算にエネルギーの下限がないことを示しました。

本回路は、5 GHz のクロック周波数を仮定した場合、1ビットあたり $1 \times 10^{-21} \text{J}$ のエネルギーでの論理演算動作が可能です。これは同じスピードで動作する半導体 CMOS 回路に対して6桁以上優れています。

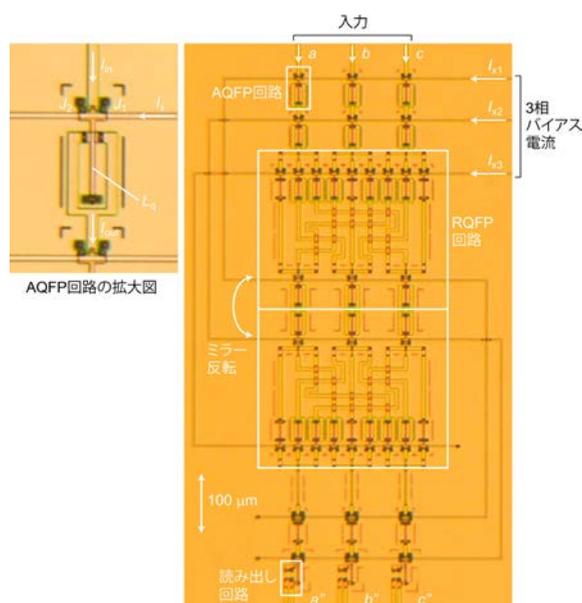


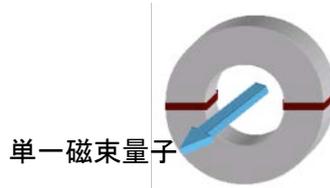
図2 可逆的磁束量子パラメトロン(RQFP)のチップ写真。回路は独立行政法人産業技術総合研究所の標準ニオブ集積回路プロセスで製作された。

【今後の展開】

本研究の成果は、論理演算回路の消費エネルギーの限界を打破するという意味で学術的に大きな意味を持つばかりでなく、スーパーコンピュータ等の高性能情報機器の消費電力を圧倒的に小さくできることを示しています。更に本技術による極限的な低消費電力回路は、量子計算器や超伝導検出器など、多くの分野への波及効果が期待できます。我々は、今後、この可逆超伝導回路を用いたコンピュータの研究開発に取り組む予定です。

【用語の説明】

単一磁束量子 (SFQ) : 超伝導体リングにおいて、リング中の磁束は磁束量子(SFQ)という磁束量($=2.679 \times 10^{-15} \text{ Wb}$)を単位として存在します。この最小単位は単一磁束量子と呼ばれます。単一磁束量子を情報担体として利用する論理演算回路は単一磁束量子(SFQ)回路と呼ばれます。



超伝導体リング中の単一磁束量子

熱雑音エネルギー : 有限温度では温度に比例して分子が乱雑に振動するため、これに伴い熱雑音が生じます。この熱雑音のエネルギーの大きさは $k_B T$ で与えられます。ここで k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度です。

量子磁束パラメトロン : 1986年に東大の後藤英一教授により提案された回路です。2つの超伝導接合を含む超伝導ループで構成されます。1980年代から1990年代にかけて、本デバイスをを用いたコンピュータの研究が行なわれていました。

論理演算回路の可逆的動作 : 下図のように n 個の入力端子と n 個の出力端子を持つ論理演算回路があるとします。この回路の入力端子からあるデジタル信号を入力した時に出力端子からある出力信号が出たとします (左図)。この出力信号を出力端子から入力信号として論理演算回路に入力した時、入力端子に元の入力信号と同じ信号が出力される場合 (右図)、論理的に可逆的計算が行なわれると言います。また、この論理演算回路は入力の数と出力の数が等しいため論理演算に伴う情報のエントロピーの変化がありません。このような回路で計算が物理的にも可逆的に行なわれる場合、論理演算におけるエネルギーを無限小にできることが理論的に予言されています。



可逆的論理回路

情報のエントロピー : 情報理論におけるエントロピーは、どれほど起こりにくい事象が生じるかという情報量を表す尺度です。デジタル信号ではビット数が多い程、情報のエントロピーが大きくなります。