

CMOS NAND ゲートにみる計算過程と熱力学的性質の関連性

[1] 要旨

コンピュータによる計算の実行に伴うエネルギーコストの理解は物理的に興味深い問題であるだけでなく、実用上重要でもある。本論文では、トランジスタのサブスレッショルド領域で動作する CMOS NAND ゲートに焦点を当て、計算の過程とそれに伴う散逸熱を解析した。計算の熱力学的性質が、ゲートへの入力電圧の違いや出力電圧のダイナミクスとどのように関連するかが明らかになった。コンピュータのエネルギー消費についての深い理解につながると期待される。

[2] 本文

パソコン、スマートフォンから、データセンターにあるサーバーに至るまで、コンピュータによる情報処理にはエネルギーを要するが、そのほとんどは熱として外部に捨てられる。この事実は当たり前のように受け取られるかもしれない。では一体どのような計算を行ったら、どの程度のエネルギーを消費することになるのだろうか。そして、これは予測可能なのだろうか。IT 技術の進展に伴って、コンピュータ関連のエネルギー需要が増大し続けている今、このような疑問は実用的にも重要である。このため、物理的な見地から計算に必要なエネルギーや、コンピュータとしての性能を議論することが今後ますます必要になるであろうと考えられる。

1961 年、IBM のランダウアーはメモリに保存された 1 ビットの情報を消去する際に発生する環境への散逸熱の下限の存在を明らかにした（ランダウアーの原理）。その下限は $k_B T \ln 2$ である（ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である）。この値は室温 300 K でおよそ 3.0×10^{-21} J ほどと非常に小さいが、メモリの情報を準静的に消去することによってのみ達成される。したがって、有限時間での消去ではこれ以上の散逸を伴うことが予想される。ランダウアーの原理を実用的なレベルでの操作に対し拡張していくことは計算の熱力学的性質を見ていく上で重要な課題の 1 つである。またコンピュータはメモリだけで構成されているわけではない。実際には多くの論理ゲートを組み合わせて論理回路を組むことで、複雑な演算を可能にしている。そのような系の計算過程と熱力学的なコストとの関連を探ることも重要だ。

最近の非平衡統計力学の研究の進展により、ランダウアーの原理で規定された下限を上回る散逸があることがいくつかの研究で明らかになってきた。またメモリ系にとどまらず、論理回路やブラウニアン計算機、計算機科学の分野で提案されたモデルなど、より複雑なコンピュータに対する熱力学的な分析が可能となった。ただし、いずれも理想的なモデルや設定に限られていた。物理的に実装されたコンピュータに対し、計算の過程とその熱力学的性質の関連性を探る研究はこれまでほとんど解析されてこなかった。

最近、筑波大学理工情報生命学術院数理物質科学研究群の研究グループは、相補型金属酸化膜半導体 (CMOS) トランジスタのサブスレッショルド領域で動作する NAND ゲートを例にとり、その熱力学的性質を拡張されたランダウアーの下限を用いて詳しく解析した。その結果、異なるゲートへの入力に対して、出力電圧の論理状態の振る舞いが付加的な散逸を伴うことを初めて明らかにした。この成果は JPSJ の 2023 年 12 月号に掲載された。

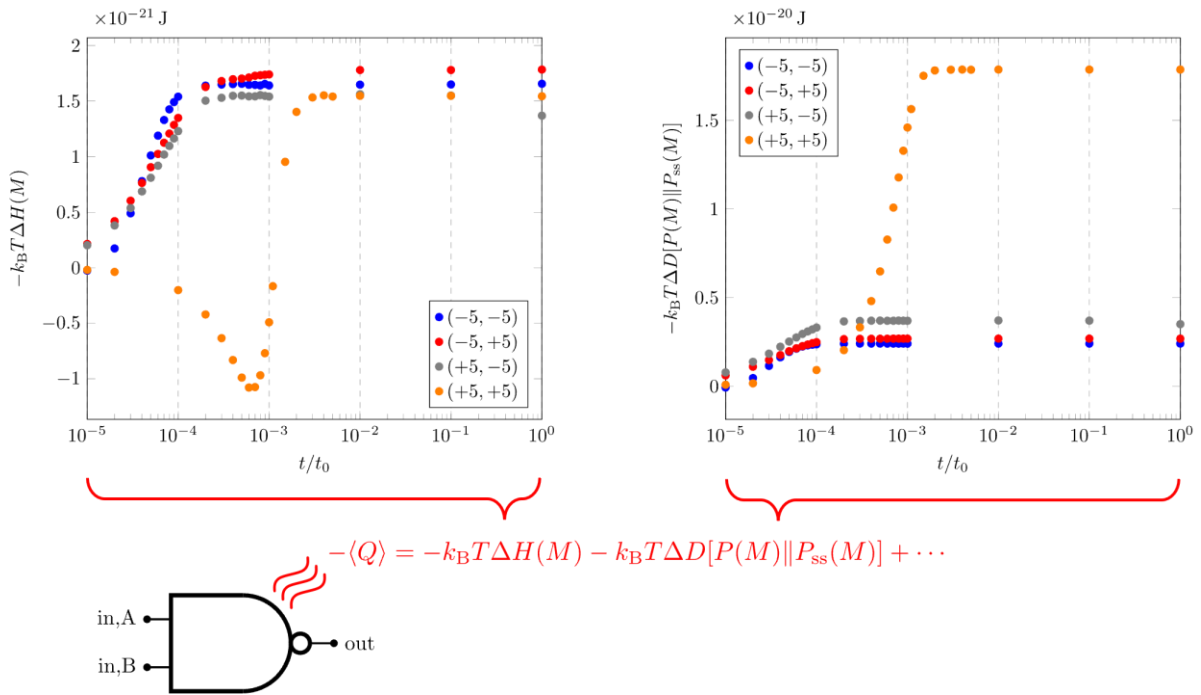


図 1. NAND ゲートからの散逸熱の時間依存性。発生熱 $-\langle Q \rangle$ に関する式の中の右辺第 1 項は論理的不可逆性に起因する散逸、第 2 項は出力電圧に符号化された論理状態の反転に伴う散逸を表す (t_0 はトランジスタのキャパシタンスや温度で決まる時間スケール、 $(\pm 5, \pm 5)$, $(\pm 5, \mp 5)$ は NAND の入力電圧 (V) を熱電圧で割った値)

ランダウアーの原理で主張している散逸は、計算後の出力状態から入力を正確に推測することができないことに起因する、論理的不可逆性によるものである。これにより、計算の前後で実現する論理的状态 M の数が減少するため、相応のエントロピー H が増大する (1 bit の完全な情報消去の場合、最大 $\ln 2$)。本研究ではこの論理的不可逆性に伴う散逸 $-k_B T \Delta H$ (図 1 左) に加え、システムの初期分布 P に依存した、Kullback-Leibler 情報量 D にみられる付加的な散逸 $-k_B T \Delta D[P(M)||P_{ss}(M)]$ (図 1 右) について、CMOS NAND ゲートを対象に調査した。その結果、異なる入力電圧の条件において、前者の散逸に差異は見られないものの、後者については一部の条件において、論理的不可逆性に伴う散逸より多くのコストを伴うことが判明した。そして、この要因が出力電圧の論理状態が反転する場合であることを見出した。

本研究成果は計算の熱力学的性質の深い理解を促し、また実際のコンピュータのエネルギー消費を分析する手法として応用上重要である。より複雑なコンピュータやアルゴリズムに対する熱力学的性質との関連性については未だ十分明らかではなく、今後の研究の展開が期待される。

原論文 (2023 年 11 月 27 日公開済)

[Thermodynamics of Computation for CMOS NAND Gate](#)

Daigo Yoshino and Yasuhiro Tokura, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 124004 (2023).

< 情報提供 : 都倉 康弘 (筑波大学 数理物質系) >