


負性インダクタンスと熱ゆらぎを積極利用した複雑な最適化問題を解く量子アニーリング

	研究代表者	名古屋大学・工学研究科・教授 藤巻 朗（ふじまき あきら）	研究者番号: 20183931
	研究課題情報	課題番号: 23H05447 キーワード: 量子アニーリング、熱ゆらぎ、負性インダクタンス	研究期間: 2023年度～2027年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

自然界では、秩序のない状態（無秩序相）から、何らかの秩序のある状態（秩序相）へ状態が変化する現象が良く見られる。たとえば、鉄などの強磁性体はキュリー点以上の温度では常磁性特性を示し、磁石に付着するという現象は見られない。一方、温度をキュリー点以下に下げると、磁区を形成し、強磁性の特性を示す。温度を下げる時に、局所的に磁場を加えると、それに対応した形で磁区の形成が起こる。この局所的な磁場を問題（入力）、対応する磁区分布を解（出力）とみなすと、この過程は計算と捉えられる。物理的な描像としては、入力によって決定されるポテンシャル形状の最安定点もしくは同等の安定点（出力）をゆらぎを利用して探る問題に帰着できる。量子ゆらぎを利用する手法は、量子アニーリングと呼ばれ、ポテンシャルの山をトンネル効果によってすり抜け、やがて最安定点に到達する。シミュレイトアニーリングでは、その山を熱活性によって飛び越える。本研究では、量子ゆらぎを基本とするものの、量子1次相転移などにより解に到達し得ない状況に直面した場合は、その状況を計算中に把握、制御された熱ゆらぎを利用して、解を探索する効率の良い量子アニーリングシステムを構築する。

具体的な回路は、超伝導回路によって実現する。特に、超伝導体／強磁性体／超伝導体の構造を持つ π 接合（後述）を利用すると、効率的に量子ビットを形成できるだけでなく、その負性インダクタンスの効果によって、量子ビット間の結合の自由度が飛躍的に増加する。量子ゆらぎに熱ゆらぎを取り入れること、そして新しいデバイスを導入することの効果も、基礎学理からプロトタイプシステムレベルで実施する。

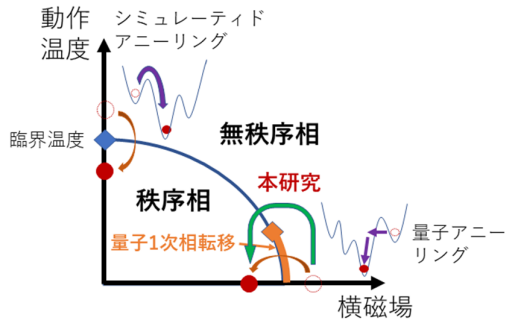


図1 本研究で目指すアニーリングの概念図。量子1次相転移などの存在で量子アニーリングが収束しない場合、熱ゆらぎを利用して、解を探索する

●本研究につながる成果

磁性ジョセフソン接合において、強磁性体の磁気特性や膜厚を適切に選ぶと、強磁性体の中でスピンの向きが反転する接合（ π 接合）が形成される。通常の接合は正のインダクタンス素子として振舞うが、この π 接合は負性インダクタンス素子として振舞う。先行して実施した特別推進研究において、 π 接合と並列にインダクタンスを接続すると、負性インダクタンスの効果が量子化条件によって顕在化し、並列接続したインダクタンスに流れる電流が印加電流よりも大きくなることを見出した。本研究では、この現象を利用して、量子ビット間を結ぶ結合回路を効率化したり、結合係数の正負の反転を行うなど高機能化を図っている。

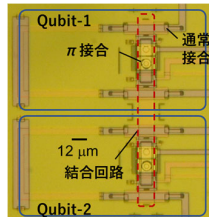


図2 π 接合による結合回路

●着想の経緯

研究チームメンバーの田中らは、量子アニーリングでは問題によっては、シミュレイトアニーリングよりも解の質が悪い（エネルギーが高い）ことを、量子モンテカルロシミュレーションによって明らかにした。一方、量子アニーリングとシミュレイトアニーリングを同時に行う温度・量子同時アニーリングが、同じ問題に対してもっとも解の質が高くなることも明らかにした。本研究では、この考えに基づき、量子アニーリングに必要な応じ熱ゆらぎを加えるアプローチをとっている。

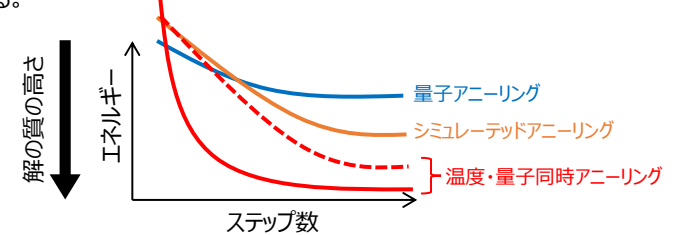


図3 温度・量子同時アニーリングの有効性の概念図

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

熱ゆらぎを積極的に利用した量子アニーリングという未知の学術領域へ計算機アーキテクチャを含む理論・実験の両面で挑戦し、学術的知見を得る。同時に、チップレベルのプロトタイプシステムを構築し、図4に示すように、従来のアニーリングシステムより、より高速に質の高い解が得られることを示す。これらを通し、大規模応用の可能性を探索し、量子アニーリングの適用範囲の拡大可能性を探る。

具体的には、以下を実施する。

- 熱ゆらぎを利用する量子アニーリングに対しモデル化を行い、熱ゆらぎによる量子1次相転移の有効な回避方法、解の質や高速化についてシミュレーション等で定量的評価を実施する。
- 大規模化に適した量子ビット、低減衰結合回路、正負反転を含む強さ可変結合回路を π 接合を利用して超伝導回路で実現する。それらを組み合わせ、さらに動作温度制御も含む量子ビットの個別制御回路を1チップに搭載した量子アニーリング回路を作製する。その実証を通して、提案する回路の優位性と熱制御の効果等を実験的に定量評価する。また、この実験結果を数値解析にフィードバックすることで、モデルの信頼性・妥当性を上げる。
- 最適解に至る途中の解をモニタして、問題を小さなグラフに再マッピングするシステムを構築する。再マッピングによる解の質の向上や高速化について検討し、再マッピングの有効性を評価する。

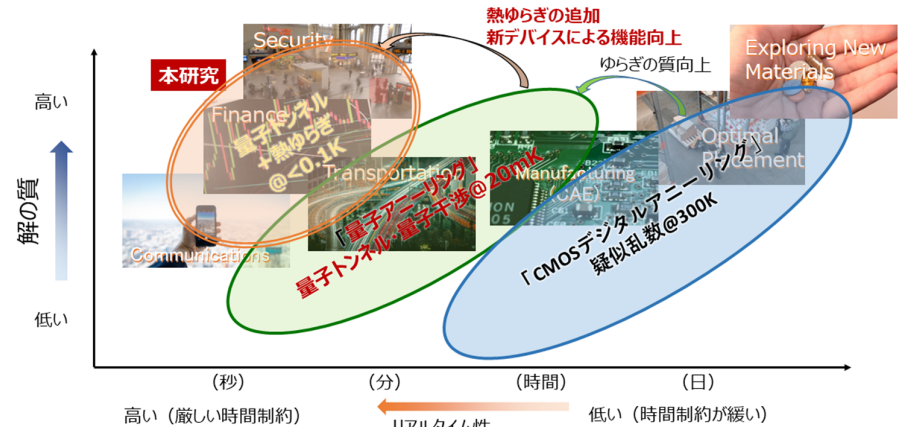


図4 2つのゆらぎを利用する応用上の利点のイメージ。より質の高い解がより高速に得られるようになり、適用範囲が拡大する。