

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500271

研究課題名(和文) 組合せ最適化問題を解く超伝導ニューラルネットワークの構成と動特性解析

研究課題名(英文) Implementation and dynamical analysis of a superconducting neural network solving a combinatorial optimization problem

研究代表者

小野美 武 (Onomi, Takeshi)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：70312676

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：組合せ最適化問題を解くホップフィールド型ニューラルネットワークを、超伝導デバイスによるニューロン素子で構成し、数値解析と集積回路上での動作から、そのネットワークダイナミクスの解析を行った。電流ゲインが高く出力特性が平坦なニューロン回路を新たに開発し、集積回路上での動作を実証した。本素子によるニューラルネットワークを設計し、解探索性能が向上することを示した。また、本研究によるニューロン回路を利用した新しい弛張発振器の構成を提案し、数値解析により動作を示した。

研究成果の概要(英文)：A Hopfield-type neural network solving a combinatorial optimization problem was designed by neuron circuits using superconducting devices. The dynamical analysis of the network was investigated by numerical simulations and operations of integrated circuits. A new neuron circuit with high current gain and flat output characteristics was developed and confirmed experimentally. The improvement of the network performance was confirmed by numerical simulations. On the other hand, a new relaxation oscillator using the new neural circuit was proposed, and its operation was confirmed numerically.

研究分野：集積回路工学

キーワード：感性情報学 ニューラルネットワーク 超伝導 組合せ最適化問題

1. 研究開始当初の背景

神経回路網における信号伝達や信号処理メカニズムを採用した情報処理プロセスでは、その高い並列性や適応化などにより、電子回路のスイッチング素子を利用したフォンノイマン型情報処理が不得手とするプロセスを、効率的に処理できる問題が存在する。そのような問題の一つに、何らかの束縛条件を満たす中で最小あるいは最大のコストを探索する、組み合わせ最適化問題がある。組み合わせ最適化問題では、一般に問題のサイズが大きくなるにつれ、解集合を構成する要素数が爆発的に増大することから、その問題のクラスはNP-完全あるいはNP困難に分類される。ニューラルネットワークによるそのような問題の解法への応用は、ホップフィールド型のネットワーク[1]を用いることで、今日まで広く研究されてきた。

一方、研究代表者および連携研究者は超伝導ジョセフソン電子回路を利用した単一磁束量子(SFQ)論理による高速・低消費電力デジタル信号処理回路への応用をこれまでに展開してきている[2],[3]。超伝導デバイスによるニューラルネットワークがこれまでに提案されてきており、我々はSFQ回路によるデジタルデバイスを用い、ストカスティックパルスコーディングを利用したニューロン回路の提案と集積化の研究を進めてきている[4],[5]。その一方、従前より連携研究者のグループでは、アナログデバイスによるニューラルネットワークの研究も実施しており、プレリミナリーな2ニューロンからなる2ビットA/Dコンバーターが実現されている[6]。このタイプのニューロン回路では、2つのSQUIDを組み合わせた(一接合SQUIDの量子状態を二接合SQUIDで読み出す)結合SQUIDにより実現される。結合SQUIDによるニューロン回路は、ジョセフソン接合3個でしきい値特性を実現でき、小規模なネットワークを簡単に構成できるメリットがある。一方デメリットとしては、アナログ回路による構成のため、デバイスパラメータのばらつきがしきい値特性の揺らぎとして厳しく反映される点が挙げられる。しかしながら、近年の超伝導二オプ集積回路の進展を考慮すると、パラメータの制御性の高い集積化が可能になってきており、組み合わせ最適化問題の様なホップフィールド型ネットワークの実現可能性が高まっている。

以上のような背景に基づき、組み合わせ最適化問題の一つとしてN-Queens問題を主題とし、結合SQUIDを利用したネットワークの設計と集積化による超伝導ニューラルネットワーク実現の着想に至った。さらに、ネットワークの振る舞いを詳しく調査、解析し、ジョセフソン電子回路特有の動作がネットワーク性能に及ぼす影響を見出すことへの学術的意義が期待される。

2. 研究の目的

組み合わせ最適化問題を解くホップフィールド型ニューラルネットワークを、超伝導デバイスによるニューロン素子で構成し、数値解析と集積回路上での動作から、そのネットワークダイナミクスを解析することが目的である。超伝導量子干渉デバイスを利用したニューロン素子上でのジョセフソン電圧発振による素子固有の揺らぎと、回路構成による発振現象を利用し、エネルギー関数上のローカルミニマムからの脱出を誘発する系を設計する。組み合わせ最適化問題としてN-Queen問題を探り上げ、ネットワークの集積化を考慮した系での解探索性能の評価から、超伝導素子特有の効果とそのネットワークダイナミクスの解明を目指す。

3. 研究の方法

結合SQUIDによる神経回路素子を、組み合わせ最適化問題を解くホップフィールド型ネットワークに適用し、数値解析によってその動作を検証する。組み合わせ最適化問題としてN-Queen問題を探り上げ、ネットワークの集積回路上でのダイナミクスを詳しく調査する。超伝導ジョセフソン接合集積回路により実現可能な回路パラメータを十分に検証した後、集積回路のレイアウト設計を行う。集積回路は超伝導工学研究所のNb/AlOx/Nb接合によるチップファンダリにて集積化を行い、極低温下にて計測を行う。結合SQUIDによる神経回路素子では、素子が活性化したときジョセフソン電圧発振による固有の揺らぎが発生することから、その解探索性能に及ぼす影響についても実測と数値解析により検証を行う。これらの結果を基に、ジョセフソン電子回路固有の物理現象を利用したネットワーク性能向上を目指した研究についての展開を考察する。

4. 研究成果

本研究では、組み合わせ最適化問題を解くホップフィールド型ニューラルネットワークを、超伝導デバイスによるニューロン素子で構成し、数値解析と集積回路上での動作から、そのネットワークダイナミクスを解析することを目的とし、総合的に研究を行った。以下にその成果を示す。

(1)ホップフィールドネットワークを実現するためのニューロン回路の最適化として、出力が平坦で電流ゲインの高いしきい値特性を有するニューロン回路の設計・試作・測定を行った。その特性を実現するために、2段の結合SQUIDをカスケードに接続する手法を新たに提案した。図1にその等価回路を示す。初段は従来と同じ回路パラメータを持つ。一方、2段目は平坦な出力特性を得るために、1接合SQUIDのインダクタンス値を大きくした構成である。インダクタンス値を大きくすることで、2段目の結合SQUID単独ではヒステリシスを伴う入出力特性を示すが、初段の

出力がステップ的であり、2段目の出力はヒステリシス領域を通過した領域で出力電圧を発生する。結果として、平坦な出力特性を持つしきい値特性が得られ、電流ゲインも従来のものより約30%大きな回路が得られた。この設計に基づき、超伝導工学研究所のチップファンダリを利用したNb/AlOx/Nb集積回路のレイアウト設計と集積化を行い、実測での動作が確認された。しかしながら、集積回路上での回路パラメータが設計値と一部異なる部分の確認され、出力電圧に非線形性が残存しており、再設計を行う必要が残った。

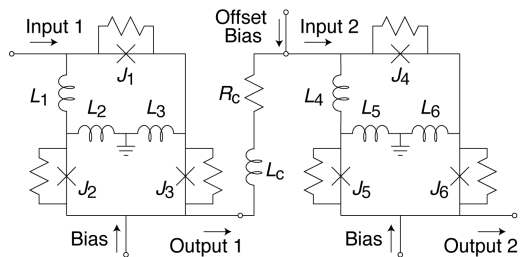


図1. 2段の結合SQUID素子によるニューロン回路

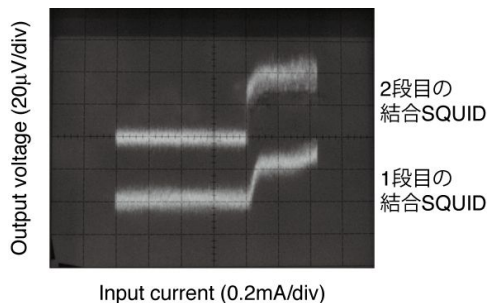


図2. 2段の結合SQUID素子によるニューロン回路の測定結果

(2) 組合せ最適化問題を解くニューラルネットワークの設計とダイナミクス解析として、N-Queens問題のN=4~6の問題サイズにおけるネットワーク設計と熱雑音を導入した確率的な数値解析によるダイナミクスの評価を行った。図3に4-Queens問題の数値解析結果の一つを示す。その結果、ネットワークの動作が確認され、ジョセフソン電子回路の固有発振によるネットワークの正解率向上が確認された。

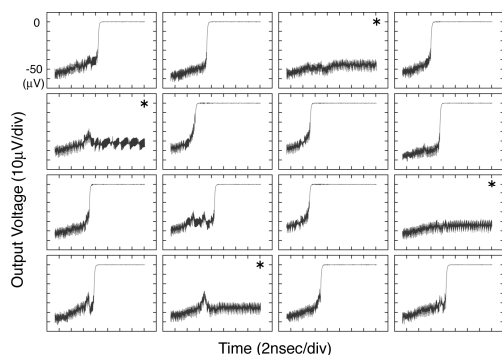


図3. 4-Queens問題(4x4ニューロン)の出力の一例(出力値はマイナス電圧で表現される。図中「*」で示すニューロン回路が終状態で正解の出力を発生している)

(3) 出力が平坦で電流ゲインの高いしきい値特性を有するニューロン回路の試作・測定を引き続き実施し、産業技術総合研究所の超伝導集積回路用試作設備を利用したNb/AlOx/Nb集積回路のレイアウト設計と集積化を行った。ニューロン回路を構成する結合SQUIDの回路パラメータを、実測による詳細な抽出により実施し、数値解析と誤差の少ない入出力特性を得ることに成功した。図4にその数値解析による特性と測定結果を示す。(発表論文)

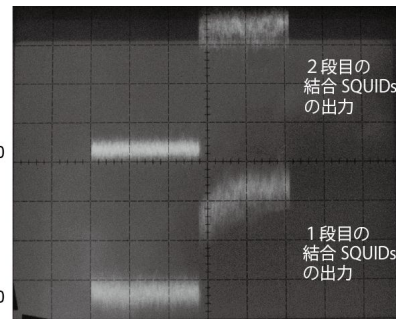
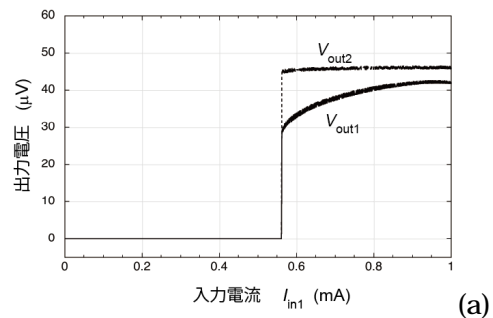


図4. 出力が平坦で電流ゲインの高いしきい値特性を有するニューロン回路 (a) 数値解析結果 (b) 測定結果

(4) 本素子の利用を想定し、組合せ最適化問題の一つである4-Queens問題を解くネットワークを設計し、数値解析による評価を行った。図5はその結果であり、時間遅れを伴う自己結合フィードバックによる励振機構を導入したネットワークにおいて、正解率の向上が得られた。(発表論文)

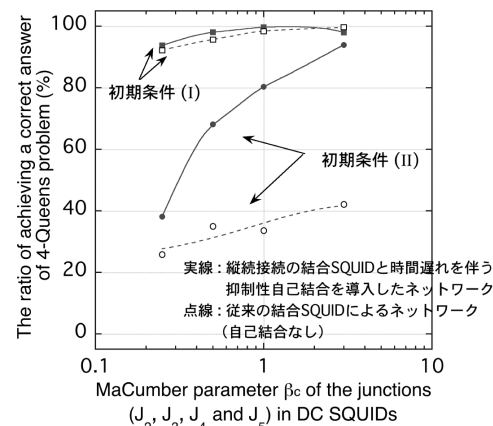


図5. 4-Queens問題のネットワーク正解率(初期条件(I)はネットワークのオフセットバイアスを上方から設計値へ、初期条件(II)は下方から加えた場合)

(5) 4-Queens 問題を解くネットワークのレイアウト設計を行い、Nb/AlOx/Nb 集積回路によるチップの試作を実施した。図6に試作を行ったネットワークのレイアウト図を示す。本回路の計測を実施したが、ネットワークの完全動作を確認するには到らなかった。これは、試作チップのパラメータ揺らぎや、多ピン計測によるノイズによる誤動作が原因と考えられ、チップ計測系の雑音対策が必要であることが判明した。チップ上でのフィルタやバイアス供給ラインの見直し、さらに外部計測系のノイズ対策を行った結果、ネットワークの一部動作が確認されたが、ローカルミニマムと思われる不正解状態や、多ピン計測による外来ノイズに起因するネットワーク終状態の不安定な動作に留まり、さらなるノイズ対策とネットワークが動作する電流バイアスマージンの拡大が必要であると考えられる。

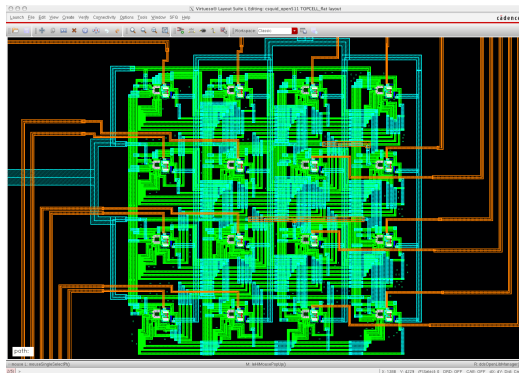


図6 Nb/AlOx/Nb 集積回路により試作を行った4-Queens問題を解くネットワークのレイアウト図

(6) 一方、本研究で開発した出力が平坦で電流ゲインの高いニューロン回路を利用することで、新しい超伝導回路用弛張発振器が構成できることを提案した。本回路では図7に示すように、シュミットトリガー型の発振器を構成し、負帰還回路を付加することで発振動作を行う。図8は数値解析の結果であり、弛張発振動作が確認された。本発振器は電流駆動能力を有しており、超伝導電子回路上の発振回路としての応用が期待される。

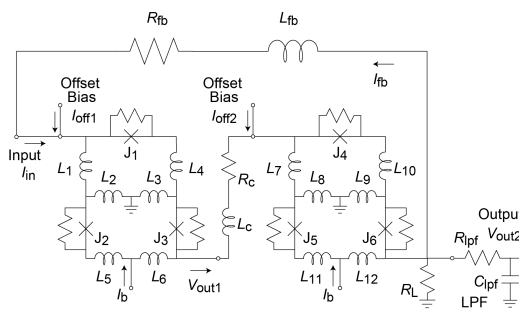


図7 超伝導シュミットトリガーインバータによる弛張発振器

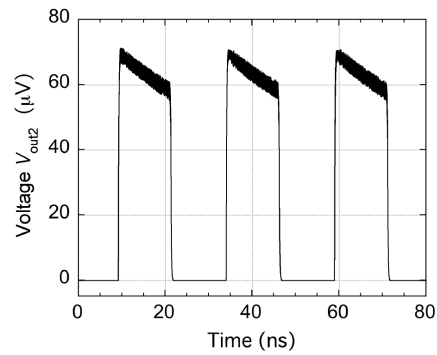


図8 超伝導シュミットトリガーインバータを用いた弛張発振器の数値解析による出力波形

以上、組合せ最適化問題の一つとしてN-Queens問題を主題とし、結合SQUIDを利用したネットワークの設計と集積化による超伝導ニューラルネットワークのための総合的研究を実施した。ネットワークの解探索性能を数値評価するところまでは至らず一部課題を残す結果となったが、超伝導回路によるニューラルネットワーク実現へ向けて、一定の指針を与えることができた。また、新しい弛張発振器の構成など、本研究から新しい概念に対する波及効果が得られる結果となった。

<引用文献>

- [1] J. J. Hopfield and D. W. Tank, *Biol. Cybern.*, vol. 52, no. 3, pp. 141-152, July 1985.
- [2] K. Nakajima, H. Mizusawa, H. Sugahara, and Y. Sawada, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol.1, no.1, pp.29-36, (1991)
- [3] T. Onomi, K. Nakajima, et.al., *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol.13, no.2, pp.583-586, (2003)
- [4] T. Kondo, M. Kobori, T. Onomi, and K. Nakajima, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol.15, no.2, pp.320-323, (2005)
- [5] T. Onomi, K. Kondo, and K. Nakajima, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol.19, no.3, pp.626-629, (2009).
- [6] Y. Mizugaki, K. Nakajima, Y. Sawada, and T. Yamashita, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol.4, no.1, pp.1-8, (1994)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

T. Onomi, and K. Nakajima, "An improved superconducting neural circuit and its application for a neural network solving a combinatorial optimization problem," *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有、vol.507, p.042029, 2014.

DOI : 10.1587/transele.E97.C.173

T. Onomi, and K. Nakajima, "Neuron Circuit using Coupled SQUIDs Gate with Flat Output Characteristics for Superconducting Neural Network," *IEICE Trans. Electron.*, 査読有、vol.E97-C, pp. 173-177, 2014.

〔学会発表〕(計 19 件)

小野美武、配線包囲型構造による超伝導マイクロストリップライン間の磁気結合度の評価、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 13 日、東海大学(平塚市)

C. Bao, T. Onomi, et. al., "Performance analysis of Bidirectional Associative Memories by using the Inverse Function Delayless model," 2014 International Symp. Nonlinear Theory and Its Applications, 2014 年 9 月 17 日、Luzern (Switzerland)

Y. Horiuchi, T. Onomi, et. al., "Back Propagation Learning Based on an IDL Model," 2014 International Symp. Nonlinear Theory and Its Applications, 2014 年 9 月 17 日、Luzern (Switzerland)

T. Onomi, "Relaxation Oscillator Using Superconducting Schmitt Trigger Inverter," 2014 International Symp. Nonlinear Theory and Its Applications, 2014 年 9 月 16 日、Luzern (Switzerland)

小野美武、超伝導シュミットトリガーインバータとその応用、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2014 年 7 月 23 日、機械振興会館(東京都)

T. Onomi, and K. Nakajima, "Basic Technology of Integrated Systems for Artificial Neural Networks," The 1st International Symposium on Brainware LSI, 2014 年 3 月 28 日、東北大学(仙台市)

辻祐也、小野美武、他、単一磁束量子対を伝送する rf-SQUID ラダー回路の動作特性、電子情報通信学会 2014 年総合大会、2014 年 3 月 21 日、新潟大学(新潟市)

小野美武、中島康治、平坦な入出力特性を持つ超伝導しきい値素子の設計と試作、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月 19 日、青山学院大学(相模原市)

A. Yamada, T. Onomi, et. al., "High-speed single flux quantum parallel multiplier using Dadda type partial product addition," 7th International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics and JSPS Core-to-Core Program Joint Seminar "Atomically Controlled Processing for Ultralarge Scale Integration", 2014 年 1 月 28 日、東北大学(仙台市)

辻祐也、小野美武、他、伝送方向向き単一磁束量子信号の rf-SQUID ラダー回路の解析、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2014 年 1 月 24 日、機械振興会館(東京都)

山田朗文、小野美武、他、木構造部分積加算回路をもつ SFQ 並列乗算器における最終加算回路の比較、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2014 年 1 月 24 日、機械振興会館(東京都)

Y. Tsuji, T. Onomi, et. al., "Characteristics of

rf-SQUID Ladder Circuits," Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2013, 2013 年 11 月 21 日、産業技術総合研究所(つくば市)

A. Yamada, T. Onomi, et. al., "Comparative Study of SFQ Parallel Multipliers," Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2013, 2013 年 11 月 21 日、産業技術総合研究所(つくば市)

山田朗文、小野美武、他、SFQ 高速並列乗算器における各種構成回路の比較、電子情報通信学会ソサエティ大会、2013 年 9 月 19 日、福岡工業大学(福岡市)

T. Onomi, and K. Nakajima, "An improved superconducting neural circuit and its application for a neural network solving a combinatorial optimization problem," 8th European Conf. on Applied Superconductivity, 2013 年 9 月 16 日、Genova (Italy)

小野美武、中島康治、平坦な入出力特性を持つ超伝導ニューロン回路の設計と試作、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013 年 3 月 28 日、神奈川工科大学(厚木市)

山田朗文、小野美武、他、SFQ 高速並列乗算器における部分積加算回路の比較、電子情報通信学会 2013 年総合大会、2013 年 3 月 22 日、岐阜大学(岐阜市)

辻祐也、小野美武、他、rf-SQUID ラダー回路の特性解析、電子情報通信学会 2013 年総合大会、2013 年 3 月 20 日、岐阜大学(岐阜市)

T. Onomi and K. Nakajima, "Design and Fabrication of an Improved Neural Circuit for Superconducting Neural Network Solving a Combinatorial Optimization Problem," Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2012, 2012 年 12 月 7 日、名古屋大学(名古屋市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野美 武 (ONOMI, Takeshi)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号: 70312676

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

中島 康治 (NAKAJIMA, Koji)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号: 60125622