研究課題別評価

1. 研究課題名：量子ビットを用いた知能デバイス

2. 研究者氏名：佐藤　茂雄
　ポスドク研究員：金城　光永（研究期間：2001.4.1～2003.9.30）

3. 研究の狙い：
　量子ビットにより実現される量子力学的ダイナミクスを導入した新しい知能処理デバイスの実現を目的とする。従来の技術では不可能とされている各種情報処理を、量子重ね合わせ状態と量子相関を使った量子計算アルゴリズムによって実現する。研究はアルゴリズムの考案とデバイスの製作という2つの課題に分かれ、両者の結果を相互にフィードバックすることによってより実用的なデバイスの実現を図る。
　計算量が発散してしまうような問題に対しては並列処理が有効である。しかし、最急降下法などの古典的なダイナミクスではエラーが生ずることが知られている。この原因はダイナミクスが局所的なポテンシャルに依存しているためであり、量子ビットを導入することで非局所的なダイナミクスが実現可能である。このことに着目して、知能処理と呼ばれるような各種情報処理について量子計算アルゴリズムの提案を行う。
　デバイスの製作にあたっては、シリコンを材料とした各種製作技術の確立とその整合性が肝要である。固体デバイスによる量子ビット実現を目的として、ナノスケールもしくは原子オーダーにおける極微細加工基礎技術の確立とともに、量子計算特有の技術であるスピンの制御と読み出しに関する技術の開発を目指す。原子オーダーでの制御はまだまだ困難な点が多いため、基礎実験でのデータ蓄積が重要であると考えられる。
　以上から、生体の神経回路とは違った原理による知能処理デバイスの実現を目的とする。

4. 研究結果：
　①ニューロ的手法を導入した断熱的変化アルゴリズム
　　Hopfield ネットワークで用いられている最急降下という手法を量子計算アルゴリズムのひとつであるハミルトニアンの断熱的変化アルゴリズムに導入することで、組合せ最適化問題などが解法可能であることを示した。併せて、問題に応じた罰則関数を使ってハミルトニアンが構成できることを示した。
　②デコヒーレンスを導入した量子計算
　　量子系ではエネルギーが保存するという特性から、あるひとつの固有状態に系を導くことは難しい。上記断熱変化アルゴリズムでも、解状態の確率振幅は大きいものの、得られる終状態は他の解でない状態との混合であり、解を見出す確率は問題のサイズに対して 2^N オーダーで小さくなる。このことを改善するために、古典系であるような散逸特性をデコヒーレンスという形で導入し、解状態への収束性能を大きく改善できることを示した。また実際の物理系での実装可能性を評価するため、スピン系のハミルトニアンを使って本計算手法が有効であることを示した。実在の系ではエネルギー準位の縮退や交差があるため、ハミルトニアンを断熱的に変化しても系が最小エネルギー状態に留まることは難しい。通常の量子計算では望ましくないデコヒー

レンスであっても、本手法では逆に有効利用することが可能であることを示した。さらにデコヒーレンスの導入により量子ビット初期化の必要がなくなることも示した。一般に量子ビット実現のためには、量子ビット製作、初期化、読み出しの3技術が必要と言われているが、本アルゴリズムでは初期化の必要がなく、またある程度のデコヒーレンスも許容することからハードウェア実現が比較的容易であると考えられる。

③Si系核スピン量子ビットの製作

Kaneによって提案されたSi中のドナー原子（P）を用いた核スピン量子ビットを実現するために、製作に必要な要素技術の確立を図った。まず本実験に特化した、水素クラッキングセルを内蔵するSTM-MBE装置の設計・製作を行った。大気にさらすことなく超高真空チャンバー内で単原子埋め込みのための一連の製作プロセスが実行可能となった。次に本装置を用いて、水素レジストとSTM探針を利用した単原子リソグラフィー技術、MBE法によるPの埋め込み技術などの開発を行った。除震対策が十分でなかったことから、量子ビット実現には至らなかったものの各種実験条件を確定することができた。またこれら実験とは別に、核スピンの読み出しに必要な単電子トランジスタを斜め蒸着法により製作した。

④超伝導位相量子ビットの製作

超伝導体で酸化膜を挟み込んだ構造を有するジョセフソン接合において2つの超伝導体間の電子波動関数の位相差を利用した量子ビットを実現することを目的として、高温超伝導体を使ったジョセフソン単接合の製作を行った。2つの高温超伝導体結晶を使い十字接合を形成し、また貼り合わせ角度を調整することにより界面上に形成される接合の電気特性を制御し、電気的に単接合を取り出すことに成功した。さらに、交流バイアス法などにより本接合の電気特性を詳細に測定し、量子ビットデバイスとしての可能性を評価した。金属材料を使った通常の超伝導体に比べ良好なデコヒーレンス特性を有することが確認された。

5. 自己評価：

研究計画に基づいてソフト・ハードの両面から研究を遂行したものの、当初の研究到達目標には及ばなかったというのが偽らざる感想である。ソフトウェアについては、新しい量子計算アルゴリズムを提案することによって、量子計算の可能性を広げることができたと考えている。ニューロで提案されている方法を量子系に導入することにより汎用性を確保し、問題に応じたポテンシャル（ハミルトニアン）の構成方法を提案することができた。また研究の狙いでも触れているようにハードウェア実現を試みることによって、緩和効果を導入するという着想に至り散逸がないことに由来する量子系特有の問題を解決することができた。しかし、知能処理と呼ばれるようなレベルには達していないためこれは今後の課題となった。またハードウェアでは、Si系核スピン製作のために必要な各種要素技術の開発を行った。極低温環境の実現、単原子リソグラフィー、不純物埋め込みのための単結晶成膜、スピン読み出し用の単電子トランジスタの製作などについて順次製作・測定技術の確立を図った。また当初は予定していなかった高温超伝導体を用いた新しい量子ビット製作も研究項目として取り入れ、ジョセフソン単接合の取り出しに成功した。超伝導体の場合には製作が比較的容易であるため、Si系核スピンよりも先に実現できる可能性が高いと考えている。研究期間内に量子ビットを実現できなかったことは残念であるが、これを発奮材料としてできるだけ早期の実現を目指したい。

本テーマのように実験が主体であり先端的技術開発が必要な研究テーマでは、高度な技術

と豊富な知識を持っているポスドク研究員が大きな戦力となることは容易に想像できるものである。ポスドク参加型の本制度にあっては、より広くかつ迅速な研究遂行が可能であり、私自身このような実感を抱く機会にしばしば遭遇した。本制度が将来にわたって継続されることを期待するものである。

6. 研究総括の見解：

量子コンピューティングの持つ重ね合わせの原理をニューラルコンピューティングに応用することにより、並列計算実行時の問題が解決できることを提案し、核スピン系と超伝導接合により実証しようとした。ソフト的には、ニューロ的手法を導入した断熱変化アルゴリズム、デコヒーレンスを導入した量子計算の可能性を広げる方法を提案し、シミュレーションによってその有効性を確かめた。ハード的には、不純物埋め込みのための単結晶成膜・スピン読み出し用単電子トランジスタ製作など、シリコン系核スピン製作のための要素技術を開発した。量子計算機の製作は新しい計算機の将来として期待されているが、乗り越えなければならないナノ技術が多く、実験的にも極めて困難な問題にチャレンジしたことは評価に値する。期間中に量子計算機に必要なハードウェアの特性を、その一端でも明確に示すことができなかったのは残念であるが、本研究で得られた技術を基礎に、近い将来に実現できることを期待したい。

7. 主な論文等：

1. 1. S. Sato, M. Kinjo, K. Nakajima: "An Approach for Quantum Computing Using Adiabatic Evolution Algorithm", Japanese Journal of Applied Physics, vol.42, part 1, no.11, pp. 7169? 7173, 2003.
2. 2. K. Inomata, T. Kawae, S.J. Kim, K. Nakajima, T. Yamashita, S. Sato, K. Nakajima, T. Hatano: "Electrical transport characteristics of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ stacked junctions with control of carrier density", Superconductor Science and Technology, vol.16, No. 12, pp. 1365-1367, 2003.
3. 3. H. Akima, S. Sato, K. Nakajima: "Single Electron Random Number Generator", IEICE Transactions on Electronics. （掲載予定）

他 1 件、口頭発表 12 件

特許

1. 出願番号：特願 2003-198362, 発明者：佐藤茂雄,
   発明の名称：乱数発生方法及び乱数発生装置, 出願日：2003 年 7 月 17 日