

量子ドット集積体と反応拡散ダイナミクスを 組み合わせた機能デバイスに関する研究

学位論文内容の要旨

近年、既存の CMOS LSI 作製プロセスの限界が叫ばれその対策が各種研究されている。それと同時に、情報化が進む現在においてより高速かつ高度な情報処理デバイスの開拓が求められている。本稿では既存の CMOS LSI デバイスとは違うアプローチで新しい機能情報処理デバイスの開発を目指す。そのために反応拡散系と呼ばれる化学反応に注目し、その動作を量子ドット集積体の実装することを考える。基本的に並列処理性を持つ反応拡散系を模倣することにより、系が持つパターン形成能力などによって各種の情報処理を行なうことができる。

反応拡散系は物質の反応とその拡散をモデル化したものであり、初期パターンに応じて時間とともにある定常パターンを発生する性質を持つ。一部の生命科学者は、例えば自然界における生物の形態生成や自己修復機能、一部の化学反応における反応物質濃度の時間振動、螺旋パターンといった散逸的な空間パターンの生成は、反応拡散系が生み出す現象であると考えている。

反応拡散系において反応モデルを一つの演算素子、拡散結合を個々の演算素子間の相互作用に置き換えて考えると、反応拡散系は「実時間で動作する並列情報処理システム」の一種とみなすことができる。並列処理型の情報システムは初期値依存性、ノイズに対して強いという性質を持つ。また並列情報処理システムは、逐次処理型の計算機では負荷の大きな処理（画像処理や計算幾何学、波動情報処理などに基づく演算）でも高速に行なうことができる。そこで反応拡散系を用いた新しい並列情報処理システムを構築する。反応拡散系は簡単には、「非線形な化学振動子」が集積配列され各振動子が「反応物質の拡散」によって相互に影響を与える系とみなすことができる。そこで量子ドット集積体の構造を生かし、また、単電子回路の非線形性を用いることにより各種の機能を持つ空間規模の大きな反応拡散系をナノデバイス上に模擬することを考えた。

本研究では、「単電子反応拡散デバイス」を設計し、コンピュータシミュレーションによりその動作を確認する。さらに、そのデバイスの応用についても検討を行い、その実現可能性を示した。また、単電子反応拡散デバイスの研究から派生した「単電子ニューラルネットワーク」、「単電子論理デバイス」について述べた。

本論文は、反応拡散系の持つ様々な機能（パターンの生成能力や自己組織化など）を量

子ドット集積体上に模擬した、「単電子反応拡散デバイス」について述べたものである。本論文の構成は以下の様になっている。

第一章では、本研究の背景を述べた。近年の情報処理デバイス開発に関する動向と新デバイス（具体的にはナノデバイスなど）の開発分野における動向についてまとめた。

第二章では、本研究で着目した単電子回路について説明した。単電子回路は量子ナノ構造のデバイスに実装され得る量子回路（他に電子スピンや磁束量子を扱う回路がある）であり、電子を一個単位で扱うことができる。ここではその動作原理と回路シミュレーションの手法について述べた。

第三章では、反応拡散系とそれが時空間リズムを自発的に生み出すメカニズムについて数理モデルを用いて説明した。また反応拡散系の性質を利用した情報処理の例をいくつか示し、その応用可能性について述べた。

第四章では、反応拡散系を模擬することにより人工的に自然・生命現象に似た系やそれを応用した新しい情報処理システムが構成できるという例を示した。さらに、反応拡散系を回路化し量子ナノ構造上に実装する手法について説明した。

第五章では、量子ナノ構造を生かしたニューラルネットワークの構成法について説明した。ここでは、反応拡散系の構成要素である非線形振動子をニューロンと見立て、そのネットワークの動作について確認を行い、応用性について述べた。

第六章では、論理回路としての単電子デバイスの構成法について述べた。単電子回路を構成する素子は、基本的にしきい判定素子として動作する。したがってこれをしきい論理回路として利用可能である。ここでは、その一例として多数決論理ゲートへの適用について説明した。

第七章では、これらの結果を総括し、本研究成果より期待できる事柄について述べた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	雨宮好仁
副査	教授	福井孝志
副査	教授	高橋庸夫
副査	助教授	浅井哲也

学位論文題名

量子ドット集積体と反応拡散ダイナミクスを 組み合わせた機能デバイスに関する研究

本研究は、化学的な複雑系である「反応拡散系」のダイナミクスを量子ドット集積回路で模倣する方法を提案し、それによって生命現象の一端とナノテクノロジーとを結びつけることの可能性を示したものである。

近年、生命現象の本質---成長や形態形成などの生き生きとしたダイナミクス---を物理化学的に説明するためのアプローチの一つとして、反応拡散系の非線形科学が研究されるようになった。反応拡散系は化学反応と物質拡散が混在した非平衡-開放状態の化学系である。複数種類の化学物質による多くの素反応の結果として、反応拡散系は高次の非線形挙動を示すとともに「散逸構造」と呼ばれる秩序をもった時空間パターンを自ら創り出す。生命現象の一端はこの反応拡散系のダイナミクスによって説明できることが知られている。

本研究では、この反応拡散系を電子デバイスの集積回路で模倣することを提案し、そのための具体的な構成方法を示した。反応拡散系は多くの単位セル---化学的な非線形振動子が集合した反応場として近似モデル化できることが知られているので、反応拡散系を電子デバイスで実現するためには以下のアプローチをとればよい。すなわち、まず多数の非線形振動子を用意して配列する。次に、近接する振動子の間に拡散現象と類似の相互作用「拡散的な結合」が生じるような工夫を設ける。しかし、既存の電子デバイスでは化学的な反応拡散系に匹敵する多数個の振動子を集積することが難しい。この点を解決するために、本研究では量子ドットによる単電子デバイスの使用を考えた。

量子ドットとトンネル接合で構成される単電子デバイスは、それだけで非線形の動作を行う。そのため複雑な回路構成を必要とせず、容易に高い集積度が得られる。この方法によって反応拡散系を電子デバイス化することが可能となる。本研究では、量子ドットの単電子デバイスによる電子的な反応拡散系を設計するに際して必要な各種の検討事項を総合的に解析し対処している。本研究で得られた主要な成果は以下のとおりである。

- (1) 反応拡散系を構成するための「非線形振動子」としてクーロンブロックード効果を利用した量子ドット単電子振動子を用いることを提案した。
- (2) 多数の非線形振動子を相互に結んで「拡散的な結合」をつくるために、電子トンネルの時間遅れを利用した結合方法を提案した。
- (3) 上記の「非線形振動子」と「拡散的な結合」を組み合わせることで二次元の反応拡散系を設計した。シミュレーション解析により、化学的な反応拡散系に類似した秩序ある散逸構造が発生することを示した。

これを要するに、本研究は化学的な複雑系である反応拡散系を量子ドット集積回路で模倣する方法を確立したものであり、生命現象の一端とナノテクノロジーとを結びつける学際的な研究分野に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。