

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名

量子スケールデバイスのシステムインテグレーション

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者：鳳 紘一郎 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授

主たる共同研究者：

藤島 実 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 助教授

柴田 直 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授

平本 俊郎 東京大学生産技術研究所 教授

伊藤 順司 産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 部門長

金丸 正剛 産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 グループ長

3. 研究内容及び成果

「NP 完全問題を解く」、あるいは「人間のよう柔軟な認識判断のできるシステムを構築する」といった問題は、現在のコンピュータのフレームワークでは非常に困難な課題である。またこれは、デバイスの極限微細化と VLSI プロセッサの超高集積化といった、従来の方法論では決して解決し得ない課題である。問題を解くためのアルゴリズム、これを実行するコンピュータ・アーキテクチャ、さらにシステムを実現する基本デバイスの機能・構造にまで遡った技術革新と、新たなコンピューティングパラダイムの創出が求められている。本プロジェクトは、シリコン VLSI 技術に量子の原理を導入することにより、これらの課題を自在に扱えるシステム実現を目指した研究である。デバイスの微細化の極限で発現する量子現象、これを高度なコンピューティングシステム構築にどのように適用するか、その方法論はまだ確立されていない。本研究は、その一つ有力な候補を実際のシステム構築により提示したものであり、将来、量子デバイスが実用化された際のシステム構成論を展開したものとして非常に重要な意義をもっている。

量子効果を用いた新たなコンピューティングパラダイムを、現実に目に見える形で実証するとともに、早期のシステム実用化に結び付けるため、二つの困難な課題、つまり「NP 完全問題」と「人間のよう柔軟な認識処理」を具体的な目標として掲げ、次の 4 つのテーマで研究に取り組んだ：①「量子プロセッサによる大規模並列演算」；②「共鳴型知的エージェントを用いた認識機能ハードウェア」；③「単電子効果を用いた機能デバイス」；④「電子場機能デバイス」。

①のテーマでは、量子コンピューティングの原理を古典的なデバイスを用いて実現する研究を行った。即ち、量子コンピューティングにおける基本演算の本質を、量子力学の原理にとらわれることなく抽出し、それを最も効率よく超並列のプロセッサアーキテクチャとして実現した。その結果、NMR 等を用いた量子コンピュータでは、7 量子ビット以下のシステムしか実現できていないのに対し、75 量子ビットのシステムを実現した。20 ビットの因数分解をショアのアルゴリズムを用いて高速計算を行い、通常のコピーに比較して 18 桁も短い時間で計算できることを実証した。これ研究の成果は、単にショアのアルゴ

リズムを実装しただけにとどまらない。量子コンピューティングの原理の本質を、VLSI プロセッサの並列アーキテクチャとして実現したものであり、量子力学の原理にとらわれない、より一般的な演算にも応用が拓ける。即ち、現在量子コンピューティングのアルゴリズムとして知られているショアとブローバのアルゴリズム以外にも、計算爆発を起こす様々な問題に応用の可能性を拓いたのである。この方向での研究が現在さらに進んでおり、今後大いに発展が期待される。

「人間のように柔軟な認識処理」の研究には、②③④の三つのテーマで取り組んだ。先ず②のテーマでは、量子現象で良く見られる共鳴特性を利用して、「人間のように柔軟な認識処理」のできる VLSI システム構築の研究に取り組んだ。この研究テーマにおける戦略は、量子共鳴現象に類似の特性を持つ CMOS アナログ回路（マイクロ・レゾナンス回路）を開発し、これを高集積化することによって量子デバイスのシステムレベルインテグレーションを実際に実現することであった。この戦略により、再現性が十分に保障された量子デバイスの実現を待つことなく、実システムの演算性能の実証が可能となった。先ず、CMOS マイクロ・レゾナンス回路を用いて、人間の過去の膨大な記憶を蓄え、入力された事象に対し最も良く似た過去の記憶を瞬時に連想想起する連想プロセッサを開発した。さらに、視野から着目すべき物体を見つけ出す VLSI、初期視覚処理を実行する VLSI 等もマイクロ・レゾナンス回路を用いて開発した。そしてこれらを用いて、手書パターンの柔軟な認識や、大病院で 10 年の経験をもつ専門医と同等の医用 X 線写真の解析等を実現している。これ等のシステムは、柔軟な認識システム構築のハードウェアアルゴリズムを開発実証したもので、今後知能システム実現の有力な候補となるものである。

②のテーマにより、量子共鳴特性が「人間のように柔軟な認識処理」実現に本質的な働きをすることが明らかにされたのを受け、③④のテーマでは、極限微細デバイス技術によって「共鳴特性」を実現する新たなデバイス創成の研究を行った。先ず③のテーマでは、シリコンの微結晶を用いたメモリ素子の研究とシリコン単電子トランジスタの研究を行った。シリコン微結晶メモリでは、極細チャネルによってメモリの高性能化をはかり、単電子の注入・放出により 3 倍の電流変調を実現した。この研究は、共鳴特性のピーク位置によって記憶を表現する連想プロセッサシステムにとって、過去の記憶を蓄える最も重要な要素技術となる。単電子トランジスタでは、結晶の局所的ストレスを応用した新たなシリコンドット形成技術により、山谷比 40 以上という優れた共鳴特性を室温で実現した。これは世界一の成果である。この共鳴特性とメモリ技術の融合により、共鳴特性を用いた連想プロセッサアーキテクチャの基本素子技術が出来上がった。また④のテーマでは、電子場デバイス研究の過程で、シリコン細線における負性抵抗効果という新たな現象を発見した。この現象の原因追求から、細線表面の帯電現象によって電流が制御されるという新たなメカニズムを発見、これを用いて共鳴特性を簡単な構造で実現するのに成功した。さらに、サイドゲートを設置することにより、その共鳴特性の関数形、ピーク位置等も簡単に制御可能であることを示した。これらの結果、シリコン技術で製作可能で、しかも室温で動作する共鳴デバイスが、ナノ加工技術の応用で実現した。

本研究プロジェクトの成果は、シリコン VLSI 技術に量子の原理を導入することにより、現在のコンピュータのフレームワークでは非常に困難な問題を扱えるシステムを実際に作ったことである。量子状態の重ね合わせを新たな並列処理プロセッサで表現し、NP 完全

問題に適用可能な VLSI 量子計算機を実現した。また、量子的な共鳴現象を人間の経験・知識の表現に用い、連想・直感・類推といった柔軟な認識処理のできる電子システムを創った。さらに量子的な共鳴特性を精度良く実現するため、単電子効果機能デバイス、ナノワイヤトランジスタ等新たな機能デバイスをシリコン技術に基づいて実現、実際の素子の試作によってそれらの有効性、並びに室温動作を実証したものである。これまで材料デバイスの基礎研究、あるいは量子コンピューティングの原理検証といった研究が中心であった量子現象の応用研究に於いて、シリコン技術で実現可能な室温動作デバイスに重点を置いて研究開発を行ったもので、今後量子現象を応用したシステム構築の研究を進める上での方法論を明らかにした重要な研究成果である。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

論文発表は英文45件、和文6件、口頭発表(ポスター発表含む)は国際会議122件、国内会議66件、そのうち招待されたものが夫々27件、8件、特許出願は国内7件、海外1件等、多くの研究成果が国際的に権威ある学会誌や学会に報告されているが、特筆すべき研究成果は書きの如くである。

- ① 量子コンピュータのアルゴリズムの重要な点を取り込んでシリコン大規模集積回路を用いて75 qbit に相当する量子コンピュータエミュレータを施策し、20 bitの因数分解を約6秒で実行できることを示したのは世界最初であり、量子コンピュータの今後の研究に対し重要な技術的判断基準を与えたこと。
- ② 共鳴エージェントを用いた簡便、且つ効率の良い連想システムを実現し、その実用性の高いことを実証したこと。
- ③ 狭チャネルのMOS電界効果トランジスタに着目し不揮発性メモリー素子として、室温単電子トランジスタの実現など世界のナノMOSデバイス研究をリードする実用性の高い成果を挙げたこと。
- ④ 相補型シリコン細線デバイスでプログラマブル共鳴特性を実現したこと。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

現在量子コンピュータに期待されている機能の一つは128 bitの公開鍵暗号解読であるが、そのためにはおおよそ 10^3 qbit を集積せねばならず、しかもこのように多数のqbitをコヒーレントな状態に維持できる時間はフェムト秒程度であろうから実用的な量子コンピュータの実現までには相当な時間が掛かると予測される。それに対し本研究チームの戦略目標である「量子スケールデバイスのシステムインテグレーション」の一環として実現した量子コンピュータエミュレータは今後アルゴリズムを改良し超並列にすることにより実用的な暗号機能を実現することの可能性を示したものであり、量子コンピュータの研究に対し重要な評価基準を与えるもので、量子コンピュータ研究に与えるインパクトは大きい。

共鳴エージェントによる連想システム、狭チャネルMOS電界効果トランジスタやシリコン細線の研究成果も実用性が高く技術的インパクトが大きい。

4-3. その他の特記事項

(a)2002年 World Automation Congress (WAC) において、Ali Javan Best Paper Award を受賞(2002年6月9日):Masakazu Yagi、Tadashi Shibata and Kenji Takada、"Optimizing Feature-Vector Extraction Algorithm from Grayscale Images for Robust Medical Radiograph Analysis," in Soft Computing, Multimedia, Biomedicine, Image Processing and Financial Engineering, Eds. Mo Jamshidi, Y. Hata, M. Fathi, A. Homaifar, and J. S. Jamshidi, Vol. 13, pp.251-257 (TSI Press, Albuquerque, 2002): Proceedings of the Fifth Biannual World Automation Congress (WAC 2002) ISSCI 2002 and IFMIP 2002, Orland, Florida, USA, June 9-13, 2002.

(b)2002年 IEEE EDS Japan Chapter Student Award:小林大輔(2002 VLSI Symposium on Technology 発表) Daisuke Kobayashi, "A Ferroelectric Analog Associative Memory Technology Employing Hetero-gate Floating-Gate-MOS Structure"

(c)丸文研究奨励賞(丸文研究交流財団):平本俊郎、「シリコン単電子デバイスとそのVLSI デバイスへの応用に関する研究」、2000年3月.