

## 自己評価報告書

平成 23 年 4 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20111004

研究課題名（和文） ゆらぎを積極的に利用するナノ情報処理システムの開拓

研究課題名（英文） Towards Noise-Driven Information Processing Systems for Nano-scale Molecular and Semiconductor Devices

研究代表者

浅井 哲也 (ASAI TETSUYA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：00312380

研究分野：集積回路工学・新複合領域

科研費の分科・細目：ナノ/マイクロ科学・ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：単電子, 雑音, 集積回路, 生体模倣, 情報処理

## 1. 研究計画の概要

熱雑音やゆらぎの要素は、システム設計において非常に悩ましい存在である。本来高い雑音耐性を有するはずのデジタル演算においても、環境雑音や電源雑音の問題が深刻になっている。雑音やゆらぎの問題は、プロセス技術やシールド技術といったデバイス製造（後）技術の問題とされることが多い。しかし問題はシステムの設計側にもある。実際、ゆらぎの影響を最小限に留めるためのデジタル処理の概念が提唱されて以来、システムの設計側から“デジタル以外の方法で”この問題に取り組み解決できた例はさほど多くない。その結果、ノイマン型アーキテクチャを主体とするデジタル回路が、現在の情報処理システムの中核となっている。

一方、自然が生み出したアナログ情報処理システムの代表である生物の神経系は、雑音を排除するのではなく活用する方向に進化したと考えられている。たとえば、昆虫（コオロギ）は、熱雑音による擾乱を活用することで触角のセンサ感度を超える微弱な信号を検出する。また、大脳皮質によく見られる構造を模した神経ネットワークは、時空間雑音を活用することで低周波雑音を高周波領域へ押し上げる（ $\Sigma\Delta$ 型アナログ-デジタル変換におけるノイズシェーピング効果）の性質を持つ。さらに、雑音を加えることで、バーストパルス信号の検出を行う神経ネットワークの出力ダイナミックレンジが大幅に向上することも明らかになった。また、雑音を加えることで、非同期に発火している複数の神経細胞が同期発火するという現象も見つかっている

雑音やゆらぎの吸収・利用は、生物の神経系だけでなく自然界のいたるところで行わ

れていると考えられる。本研究は、自然が雑音やゆらぎを吸収・利用する仕組みに学んだ機能システムのアーキテクチャ構築を目的とする。生物の自己組織化や脳の情報処理方法に学び、ゆらぎを積極的に利用する情報処理方式を確立することが本研究の最終目標である。

## 2. 研究の進捗状況

これまでの研究の進捗状況と結果を下記の項目(1)から(6)に述べる。

- (1) 確率共鳴による微弱信号検出器（雑音の力を借りて微弱信号を検出）  
単分子素子による分子トンネル接合の巨大ネットワークを構成し、A04 班との共同研究により、分子ナノネットワーク（熱雑音に鋭敏なしきい素子）を構成し、そこで起こる確率共鳴現象を確認した。また、理論的な IV 特性関数を導出し、実験結果との一致を確認した。
- (2) ゆらぎを利用する A/D 変換器（雑音の力を借りて低周波雑音を抑制）  
単分子素子向けのパルス密度変調器を構成した。大規模な単電子回路ネットワークのシミュレーションにより、低周波領域における雑音が、ゆらぎにより抑制される現象を示した。
- (3) 高速信号伝送路（雑音の力を借りて超低消費電力回路で高速パルス伝送）  
単分子デバイス化を想定した超微小電流駆動方式の CMOS 興奮場を構成し、その系におけるパルスの伝搬速度が雑音により増加することを示した。雑音が増えられた場合（実線）は、そうでない場合と比較して出力が入力に追従するレンジが大幅に広がることがわかった。

- (4) 雑音誘起同期回路(雑音の力を借りて独立した回路群の位相を強制同期)超微小電流で駆動された独立した CMOS 発振器が、外部共通雑音により強制的に同期させられることを示した。
- (5) 確率共鳴メモリ(雑音の力を借りて極低消費電力メモリを正しく動作させる)単分子デバイス向けの超微小電流で動作する双安定回路を構成し、シミュレーションにより電力削減量および動作可能周波数の見積もりを行った。
- (6) その他の脳型情報処理回路  
A01 班内の共同研究により、神経素子間を結合するシナプス素子に応用できる単極型の抵抗変化デバイスの基本モデルを構築した。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。提唱したゆらぎ利用情報処理アーキテクチャの CMOS 集積回路化、単電子回路化については問題は生じず、これまで 21 件の雑誌論文を発表した。しかし、提唱した半導体デバイスのための基本アーキテクチャをそのままの形で分子ナノシステム上に展開することが困難であった。ただし、既存 CMOS プロセスの 10% 程度の配線制御が可能であれば、提唱したアーキテクチャの分子デバイス化が可能である。また、A04 班との連携により、既存分子ナノプロセスの様々な制約が明らかになったため、今後はプロセス上の制限を考慮した上で、提唱したアーキテクチャの一部改良が必要である。

### 4. 今後の研究の推進方策

分子ナノシステム上で確率共鳴素子を用いた微弱信号検出およびメモリ素子動作実証を行う。また、空間ばらつきを含むクーロンブロッケード回路ネットワークモデルの大規模シミュレーションを行い、理論との相違点および浮遊電子のふるまいを明らかにする。確率共鳴メモリについては、双安定性を持つダイナミックな系 (FitzHugh R. Bull. Math. Biophysics, vol. 17, pp. 257-278, 1955, など) を単分子トランジスタにより構成し、シミュレーションおよび実験によりその動作と有効性を実証する (単分子トランジスタの試作評価は A04 班において完了)。

また、A04 班の単分子トランジスタによる積分発火型回路を用いて、A/D 変換器および信号伝送路に関するシミュレーション評価を行う。また、位相同期については、分子ナノシステムによる振動子の実装が困難であることが予測されたが、分子システムそのものが持つリズム性を利用したデモンストレーションができる見通しが立っている (参考文献: 吉川研一著, 非線形科学-分子集合体

のリズムと私たち, 学会出版センター, 1992) が、実験が (時間的制約により) 不可能な場合は、そのモデルを用いた雑音誘起位相同期のシミュレーション評価を行う予定である。

### 5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計 21 件)

- ① Oya T., Schmid A., Asai T., and Utagawa A., "Stochastic resonance in a ballanced pair of single-electron boxes," *Fluctuation & Noise Letters*, (2011), in press. 査読有
- ② Kikombo A.K., Asai T., and Amemiya Y., "Neuro-morphic circuit architectures employing temporal noises and device fluctuations to improve signal-to-noise ratio in a single-electron pulse-density modulator," *Int. J. Unconventional Computing*, (2011), in press. 査読有
- ③ Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "High-fidelity pulse density modulation in neuromorphic electric circuits utilizing natural heterogeneity," *IEICE NOLTA*, vol. 2, no. 2, pp. 218-225 (2011). 査読有
- ④ Akou N., Asai T., Yanagida T., Kawai T., and Amemiya Y., "A behavioral model of unipolar resistive RAMs and its application to HSPICE integration," *IEICE ELEX*, vol. 7, no. 19, pp. 1467-1473 (2010). 査読有
- ⑤ Utagawa A., Sahashi T., Asai T., and Amemiya Y., "Stochastic resonance in an array of locally-coupled McCulloch-Pitts neurons with population heterogeneity," *IEICE Trans. A*, vol. E92-A, no. 10, pp. 2508-2513 (2009). 査読有
- ⑥ Kikombo A.K., Asai T., and Amemiya Y., "An elementary neuro-morphic circuit for visual motion detection with single-electron devices based on correlation neural networks," *J. Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 6, no. 1, pp. 89-95 (2009). 査読有

[学会発表] (国内学会発表 55 件, 国際会議発表 35 件, 招待・依頼講演 19 件 計 109 件)

[図書] (計 6 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www-souhatsu.sanken.osaka-u.ac.jp/>

<http://lalsie.ist.hokudai.ac.jp/~asai/>