

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2013～2017

課題番号：25110013

研究課題名（和文）単一分子集積ネットワークによる情報処理機能実装と信頼性向上

研究課題名（英文）Implementation of information processing function on single-molecule-integrated networks and improvement of its reliability

研究代表者

葛西 誠也 (Kasai, Seiya)

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：30312383

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 75,700,000 円

研究成果の概要（和文）：個々の分子の機能を生かした究極の情報処理システムを実現するべく、環境から受けるゆらぎと共存しつつ分子を利用し情報処理可能な演算方法、システム構成、そして信頼性を高める方法について研究を行なった。炭素1層からなるグラフェンをもちいた論理ゲートの実現、個々の分子がもつ微小な電荷を高感度で検出する技術や解析方法、自然や生物に学んでゆらぎを積極的に利用して高度な情報処理を行う電子アレーバシステムを開拓した。さらに雑音によって微小信号感度を高める反直感的な現象である確率共鳴が分子において特に効果的に起こることを理論的に示し、ゆらぎのもとで動作する単一分子システムの実現可能性を広げた。

研究成果の概要（英文）：Toward an ultimate information processing system integrating functional single molecules, we investigated and developed single-molecule technologies that make it possible to correctly operate under indispensable fluctuation, including information processing scheme and architecture based on single molecules, and a novel nonlinear dynamic processing approach providing reliable operation. We achieved basic Boolean logic gates using a simple graphene-based three-terminal nanojunction device, a novel detection technique for molecular charge dynamics and its analysis, amoeba-inspired solution search computer for solving combinatorial optimization problems that works exploiting temporal fluctuation. Furthermore, we found out a new model of stochastic resonance in a bistable system where the response to weak signal is enhanced by adding noise and particularly this mechanism clearly appears in nano and molecular scale systems.

研究分野：半導体電子デバイス

キーワード：単一分子デバイス 情報処理 確率共鳴 信頼性

1. 研究開始当初の背景

単一分子エレクトロニクスは設計制御可能な最小の材料で構成され、究極の微細電子システムを実現しうる。単一分子技術は近年発展が著しく、情報システム構築が視野に入った。ここでの大きな問題は、環境との強い相互作用によってもたらされる雑音や特性のばらつきなどの「ゆらぎ」である。単一分子情報システムの構築には、分子機能とサイズを活かしつつゆらぎを克服し情報処理を可能とする演算手法、構成(アーキテクチャ)、機能実装法を見出さなければならない。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の2つである。

- ・単一分子論理演算アーキテクチャ開拓と基盤技術構築
- ・確率共鳴による単一分子デバイスの動作信頼性向上

これまでに蓄積してきた半導体量子ナノデバイスと集積回路化の実績を活かし、分子ネットワークや信号伝達操作に相応しい情報表現・演算手法を導入し、本領域の優れた単一分子技術を駆使して実装に必要な機能と構造を創出する。雑音によって微弱信号への応答が最適化される特異な現象「確率共鳴」を単一分子上で引き起こし動作信頼性向上手法へ発展させる。

3. 研究の方法

・単一分子論理演算アーキテクチャ開拓と基盤技術構築：情報表現演算手法として脳情報処理の基本演算手法であるしきい論理、単細胞生物粘菌が餌を探す能力にもとづく最適化問題探索など生物・自然に根付いた情報処理手法を軸に据え、演算機能実装に必要な要素やシステムを単一分子技術で実現する方法を編み出す。

・確率共鳴による単一分子デバイスの動作信頼性向上：確率共鳴の原理「非線形系でのゆらぎ支援による状態遷移」に従い、単一分子の非線形特性とゆらぎによって確率共鳴を単一分子上で発現させる。ゆらぎが避けられない状況下でデバイス動作信頼性を高めるため、単一分子ゆらぎ計測技術を開拓し評価解析によりゆらぎ性質を明らかにする。得られたゆらぎ情報に基づき最適な非線形特性や分子ネットワークを設計し性能実証する。デバイスレベルの信頼性向上技術をシステムレベルへ展開してゆく。

4. 研究成果

(1) 分子電荷ダイナミクスの計測技術開発

分子がもつ微小電荷の時間変化を高感度に計測する技術を開発した。表面電荷に敏感なIII-V族化合物半導体ナノワイヤを電荷センサとし、さらにナノワイヤ上の分子と金属電極を容量結合させることで電荷検出感度を選択的に高めるメカニズムを独自に見出した。金属電極としてナノワイヤ電界効果トランジ

スタ(FET)のゲート電極を利用する形態、および、走査プローブ導電性短針を用いる形態で単一分子電荷の動的変化がナノワイヤ電流雑音となって現れることを実証した(図1)。

A04 班赤井 Gr、A01 班小川 Gr との共同研究により電流雑音解析によって単一分子の情報を引き出すことに成功した。A01 班小川 Gr との共同研究により、分子ネットワーク中を移動する電荷を検出するための分子電荷空間分解検出デバイスの提案と試作プロセス開発を行なった。さらに、熊本大学谷田部助教との共同研究により、雑音周波数スペクトルから分子電荷ダイナミクスの時定数を解析的に導き出す強力な解析手法を開発した。

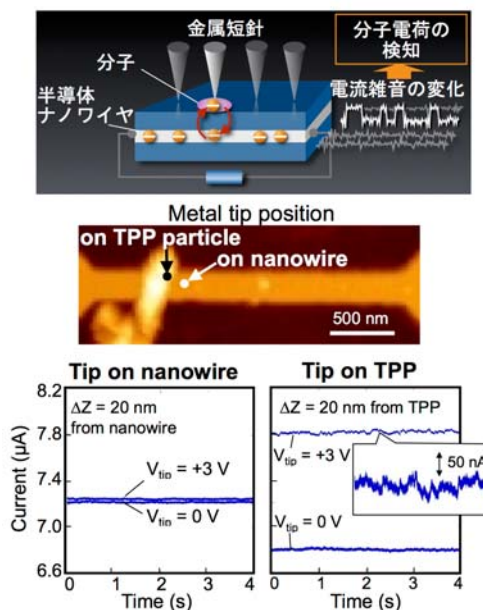


図1 分子電荷ダイナミクス検出の概念と分子電荷のナノワイヤ電流への反映

(2) グラフェンナノ接合論理ゲートの開発

3つのグラフェン細線をT字またはY字に接合させただけの3分岐ナノ接合デバイス1つで基本ブール代数論理ゲートであるNOT, AND, ORゲートの機能実装できることを提案し、実験実証した(図2)。

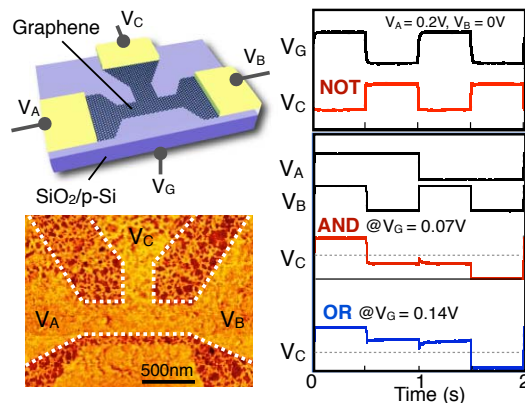


図2 グラフェンナノ3分岐接合デバイスと基本論理ゲート動作

試作素子においては AND と OR 機能をバックゲート電圧によって切り替えることにも成功した。出力の論理振幅が小さい問題があったが、振幅制限要素を明らかにし、改善策を示した。さらに改善策のうち最も効果的であるグラフェンナノリボン (GNR) の利用を目指し、A01 小川・田中 Gr および A03 山田 Gr との共同研究によって GNR デバイスプロセスを開発した。また、遍くグラフェン電子デバイスの性能向上に不可欠である金属/グラフェンオーミック接合界面の詳細評価を行い、高接触抵抗の原因となる界面残留物を同定して残留量と接触抵抗の関係を明らかにし、低接触抵抗を再現性よく実現するプロセスを開発した。

(3) 確率共鳴の理論と応用

雑音が微弱信号に対する感度を高めるといふ、直感に反する応答をみせる双安定系での確率共鳴の本質を明らかにすべく数理モデル化と解析を進めた結果、ナノ・分子系における確率共鳴はマクロ系とは様相が異なり、本質的に微小信号を超高感度検出可能であることを理論的に明らかにした (図3)。そして本効果がガウス分布関数の特異な非線形性に基づくことや、本効果を発現するための条件など複数の重要な知見を得た。また、確率共鳴発現に不可欠である非線形関数の設計論を発展展開するとともに、最適非線形関数の利用による信号検出改善効果を実験実証した。

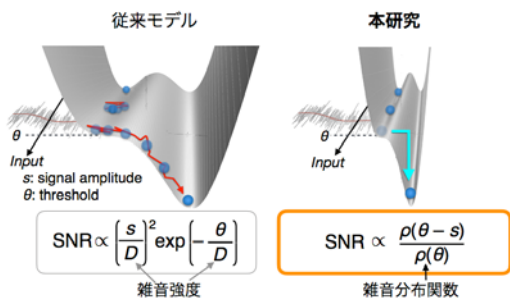


図3 マクロおよびナノ・分子系での雑音支援状態遷移と応答式

以上に基づき、A03 多田 Gr との共同研究で自己組織分子デバイスでの確率共鳴観測を試みた。明確な現象観測には至らなかったものの、高電界のもとで分子が環境との相互作用を急激に強め自発的な電荷ダイナミクス発生に至り電流スパイクをバーストすることを発見しパルス発生機としての可能性を得た。

同時に確率共鳴の応用を進め、悪環境下での画像検出や微弱表面筋電位検出技術、さらにその直感的インターフェースへの応用展開を図りロボットアーム制御のデモンストレーションを行なった。

(4) 新規ダイナミック計算システムの開拓

分子電荷が時間的にゆらぐダイナミクスをもつことからゆらぎを生かす計算システムの

研究開発に取り組み、慶応大青野真士准教授との共同研究により生物粘菌に倣った新しい計算システム「電子アメーバ」を創出した。アナログ電子回路の物理系としての定常状態収束ダイナミクスとゆらぎを利用し計算困難な組合せ最適化問題の1つである充足可能性問題 (SAT) を解くことに成功した (図4)。解発見のメカニズム探索の一環として、粘菌変形における伸長と収縮に対応する回路時定数の差異が解探索効率と強く相関し、適切な速度比において高い探索効率を実現することを見出した。さらに熱ゆらぎを利用して解探索をするナノワイヤブラウザラチェットネットワークによる実装形態も編み出した。

A04 浅井 Gr との共同研究によりニューラルネットワークを利用した計算システムの1つであるリザーバ計算システムを分子集合体によって実装する可能性を見出した。電子回路によって基本コンセプトを確認した。また上記(1)で開拓した分子電荷計測技術を利用し、A01 田代 Gr との共同研究によりシステム構成に適した分子材料の検討を進めた。有望な分子として多重電荷充放電が可能なポリリン酸 (POM) 分子に着目しその分子電荷ダイナミクスの基礎評価を行い、リザーバ応用可能性を確認した。

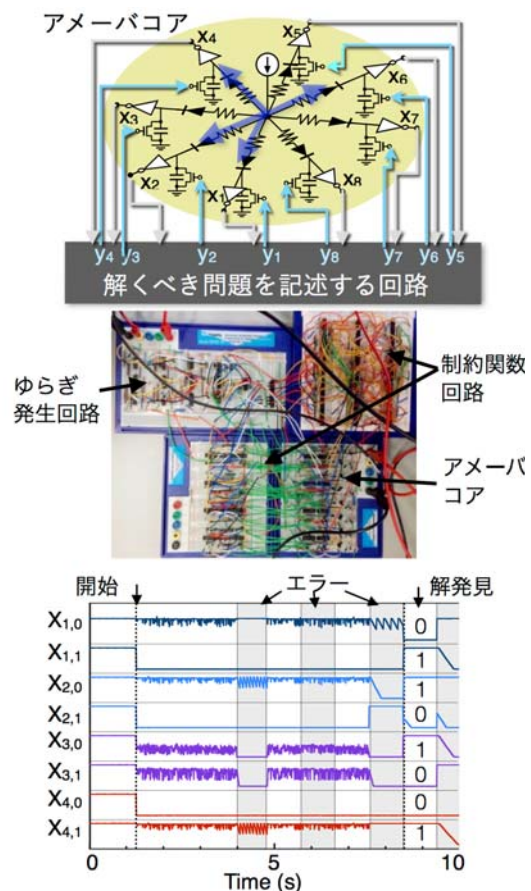


図4 最適化問題解探索システム電子アメーバの構成、試作回路および解探索時の状態変数変化

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 25 件)

- ① S. Kasai, A. Ichiki, and Y. Tadokoro, "Divergence of relative difference in Gaussian distribution function and stochastic resonance in a bistable system with frictionless state transition", *Appl. Phys. Express* 11, pp.037301.1-4 (2018). (査読有)
DOI: 10.7567/APEX.11.037301
- ② S. Okamoto, M. Sato, K. Sasaki, and S. Kasai, "Detection of charge dynamics of a tetraphenylporphyrin particle using GaAs-based nanowire enhanced by particle-metal tip capacitive coupling", *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, pp.06GK02.1-6 (2017). (査読有)
DOI: 10.7567/JJAP.56.06GK02
- ③ M. Aono, S. Kasai, S.-J. Kim, M. Wakabayashi, H. Miwa, and M. Naruse, "Amoeba-inspired nanoarchitectonic computing implemented using electrical Brownian ratchets", *Nanotechnology* 26, pp.234001.1-8 (2015). (査読有)
DOI: 10.1088/0957-4484/26/23/234001
- ④ S. Kasai, Y. Tadokoro, and A. Ichiki, "Design and characterization of nonlinear functions for the transmission of a small signal with non-Gaussian noise", *Phys. Rev. E* vol. 88, p.062127.1-6 (2013). (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevE.88.062127
- ⑤ S. Kasai, M. Aono, and M. Naruse, "Amoeba-inspired computing architecture implemented using charge dynamics in parallel capacitance network", *Appl. Phys. Lett.* vol. 103, p.163703.1-4 (2013). (査読有)
DOI: 10.1063/1.4826143

[学会発表] (計 109 件)

- ① K. Sasaki, R. Kuroda, X. Yin, M. Sato, T. Ogawa, and S. Kasai, "Fabrication and Characterization of A Multiple Gate Nanowire FET for Detecting Spatially Distributed Molecular Charges", *The 43rd International Symposium on Compound Semiconductor (ISCS2016)*, Jun. 26-30, 2016, Toyama, Japan.
- ② S. Kasai, et al., "Fluctuation-induced Dynamics and Information Transfer in Nonlinear Nanodevices and Molecular Devices", *The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies*

2015 (Pacifichem 2015), Dec. 15-20, 2015, Honolulu, Hawaii, USA (invited).

- ③ K. Shirata, S. Kasai, et al., "Robust and High Sensitive Myoelectric Signal Detection Utilizing Stochastic Resonance with Carbon Nanotube Composite Paper-based Surface Electrodes", *2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2015)*, Sep. 27-30, 2015, Sapporo, Japan.
- ④ S. Kasai, "Stochastic Resonance and Related Phenomena in Nonlinear Electron Nanodevices", *6th IEEE International Nanoelectronics Conference*, Jul. 28-31, 2014, Sapporo, Japan (invited).
- ⑤ Y. Imai, M. Sato, T. Tanaka, and S. Kasai, "Study on Weak Biological Signal Detection Utilizing Stochastic Resonance in a GaAs-based Nanowire FET", *26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2013)*, Nov. 5-8, 2013, Sapporo, Japan.

[図書] (計 3 件)

- ① S. Kasai et al., "Boolean Logic Circuits on Nanowire Networks and Related Technologies", *Nanophotonic Information Physics*, ed. M. Naruse, Springer, 2014, pp.115-143.
- ② S. Kasai et al., "Physarum-Inspired Electronic and Nanoelectronic Computing Systems", *Advances in Physarum Machines - Sensing and Computing with Slime Mould-, Emergence, Complexity and Computation Vol. 21*, Ed. A. Adamatzky, Springer, Switzerland, 2015, pp.109-132.
- ③ S. Kasai et al., "Detection and Control of Charge State in Single Molecules Toward Informatics in Molecular Networks", *Molecular Architectonics - The Third Stage of Single Molecule Electronics-*, Ed. T. Ogawa, Springer, Switzerland, 2017, pp.69-94.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

- ①名称: デバイス
発明者: 葛西誠也、齊藤健太、青野真士
権利者: Amoeba Energy、北海道大学
種類: 特許
番号: 特許願 2018-093127 号
出願年月日: 平成 30 年 5 月 14 日

国内外の別：国内

②名称：ロボット、ロボット制御方法、およびプログラム

発明者：葛西誠也、斉藤健太、末藤直樹、青野真士

権利者：Amoeba Energy、北海道大学

種類：特許

番号：特許願 2018-093128 号

出願年月日：平成 30 年 5 月 14 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 4 件）

①名称：信号再生装置及び信号再生方法

発明者：葛西誠也、田所幸浩、一木輝久

権利者：北海道大学

種類：特許

番号：特許第 9287926 号（米国）

取得年月日：平成 28 年 3 月 15 日

国内外の別：国外

②名称：論理回路

発明者：葛西誠也

権利者：北海道大学

種類：特許

番号：特許第 5835771 号

取得年月日：平成 27 年 11 月 13 日

国内外の別：国内

③名称：信号再生装置

発明者：葛西誠也

権利者：北海道大学

種類：特許

番号：特許第 5761643 号

取得年月日：平成 27 年 6 月 19 日

国内外の別：国内

④名称：信号再生装置及び信号再生方法

発明者：田所幸浩、一木輝久、葛西誠也

権利者：豊田中央研究所、北海道大学

種類：特許

番号：特許第 9287926 号

取得年月日：平成 28 年 3 月 18 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.rciqe.hokudai.ac.jp/labo/qid/>

アウトリーチ活動

① Academic Fantasia（北海道大学 国民との科学・技術対話推進事業）平成 26～28 年度

② キッズフォレスト 2016 講演 平成 28 年 10 月 2 日

③ 応用物理学会北海道支部サイエンスオリエンテーリング 平成 25～29 年度
報道関連情報

① “Why Noise can Enhance Sensitivity to Weak Signals”

<http://www.sciencenewsline.com/news/2018040601170028.html> 他 14 ソース

② 「機能紙・不織布：繊維と機能材の複合化で性能アップ。紙の凹凸活かした筋電電極など新たな提案も」、コンバーテック（技術情報誌）、平成 29 年 5 月号

③ “Amoeba-inspired computing system outperforms conventional optimization methods”

<https://phys.org/news/2015-06-amoeba-inspired-outperforms-conventional-optimization-methods.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛西 誠也（KASAI, Seiya）

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：30312383