

生体に学ぶゆらぎエレクトロニクス

Yuragi Electronics Inspired by Living Bodies

課題番号：24226014

田畑 仁 (TABATA HITOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要

“スピンゆらぎ”は脳神経回路との類似性が1982年に理論的に予言されたものの、室温動作可能な絶縁性スピングラス材料が存在しなかった。本研究により鉄ガーネットでは室温スピングラスを達成し、ジュール熱損失が不可避の電流伝搬ではなくスピン角運動量伝搬（スピン流）による低消費電力機能性を併せ持つ新規脳型コンピュータ実現への可能性を拓いた。

研究分野：酸化物エレクトロニクス、バイオエレクトロニクス

キーワード：スピングラス、マグノニクス、ゆらぎ、確率共鳴

1. 研究開始当初の背景

一般にコンピュータの特徴は、熱雑音に対して高エネルギーを用いて誤作動率を極めて低く抑さえ、決定論的動作を高速に行う点にある。しかし、その高速な処理は膨大な消費電力を伴う。また、その動作を規定するアルゴリズムはソフトウェアとしてハードウェアから切り離され、システムは環境変動に対し脆弱である。一方、生体情報処理の特徴は、熱ゆらぎ（生体ゆらぎ）を利用することによって、処理速度が低速であるが、熱雑音と同レベルの低エネルギーで確率的に動作する点にある。しかしながら、こうしたあいまいで確率的にゆらぐ素子がシステム化されると、脳に見られるような生体特有の柔軟な情報処理が生み出される。例えば、脳を構成する神経細胞一つ一つは雑音を包含している素子であるにもかかわらず、それらが集まると信頼性が高い情報処理が可能なシステムを構築している。またアルゴリズムを自発的に形成することができ、そのシステムは環境変動に対し頑強（ロバスト）なものになると期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では阪大在職中よりゆらぎPJに関連して進めてきた研究を発展させ、生体における「ゆらぎの利用」を「情報処理」へ活用することにより、脳機能に代表される生体機能を備えた、従来には無い新しい情報処理システムを構築し、生体に学んだ超低消費電力デバイスを創製する事を目的としている。

“生体に学ぶ”ことで、これまで“悪者”であった“ばらつき、ゆらぎ”を積極的に活用した新しいデバイス（情報処理素子、メモリ素子）の実現を目指す。生体が生来備え、巧妙に活用している“情報のゆらぎ：確率共鳴現象による情報処理原理”を利用するという、従来とは、全く逆の発想（アプローチ）により、新しい情報処理システムの学理を構築し、超低消費電力デバイス（確率共鳴デバイス）を創製する。これまでは”厄介者”であった“熱ゆらぎ/環境からのエネルギーを生かす”逆転の発想による超低消費電力デバイスの実現が期待できる。

3. 研究の方法

生体ゆらぎを模倣するため、まず室温スピンゆらぎ材料の開発を進める。先行研究で開発した、室温クラスターガラス材料：スピネル型フェライト材料を活用して、その“スピンゆらぎ”を利用することで、生体ゆらぎの模倣を試みる。具体的な材料として Fe_3O_4 に Mg^{2+} , Al^{3+} , Ru^{3+} , $\text{Ti}^{3+/4+}$ 等を置換した化合物を検討する。

スピネル型フェライトはスピンの状態変化を磁気抵抗変化により電流値として読み出すMTJ（磁気トンネル接合）素子として利用することを想定している。そのためジュール熱によるエネルギー損失が避けられない。そこでもう一つのアプローチとして、電流は流さずスピン状態（スピン角運動量）のみを伝搬させるスピン流を利用した素子についても作製する。この場合は実際の電子移動は発生せず、スピン情報（スピン角運動量）が

伝搬するため、電流による熱損失が発生せず、省エネルギーデバイス実現が期待される。

さらにスピングラス材料に於ける、“スピンゆらぎ”を活用した脳型情報処理素子の研究開発を目指す。シナプス情報処理の原理式が、スピングラス状態と同値の物理的数式（ハミルトニアン）で示されることを利用して、スピングラス材料により脳機能模倣型の情報処理素子の開発を目指す。

具体的には、磁性素子として磁気記憶装置利用が期待されている磁気抵抗素子をモデルとして、磁性(100nm)/絶縁体(1~2nm)/スピングラス材料のスピントンネル接合素子においてトンネル接合の障壁を閾値として、スピントンネル電流を検出することにより、脳型低消費電力デバイスを実現させる。スピングラスを認知・判断機能素子としてスピンインジェクション層に使用する事で、最適解と照合(認知・判断)するフィルター機能を検証する。

4. これまでの成果

これまでの3年間において、薄膜工学手法により、

①2次元歪源による傾斜歪構造によって高エネルギー域(THz領域)のスピン-フォノン結合モードの生成に成功: Phys.Rev.B 2015

②3次元歪源によるクラスタガラスによってシナプス模倣スピン波デバイスの作製に成功: APEX 2015

という2つの大きな成果を達成した。

特に脳型コンピュータ実現に向けて、スピネル型鉄酸化物に加えて、一般に宝石として知られる(熱的・化学的安定材料)ガーネット結晶に、磁性元素(希土類)と人工的な結晶格子歪(フラストレート)を導入する新しい発想で“スピンゆらぎ”という新たな物性の生命を吹き込み、世界初の同材料によるスピンゆらぎ特性の室温動作を実現した(APEX 2015)。

これにより作製したスピン素子は、量子力学的効果に基づくスピン応答の高速性、ジュール熱損失が不可避の電流伝搬ではなくスピン角運動量伝搬(スピン流)による低消費電力機能性を併せ持つ新規脳型コンピュータ実現に道を拓くものであり、高度情報化、エネルギー問題等の社会的意義において大きなブレークスルーを成しうる成果であるといえる。

5. 今後の計画

ガーネット-白金接合におけるスピン軌道相互作用をしたスピン状態の電気信号読み出しを確立する。さらに複数素子から成るデバイスを作製し、確率共鳴演算の動作を実現する脳型素子を目指す。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む) 代表的な論文

1) "Long-term potentiation of magnonic synapses by photocontrolled spin current mimicked in reentrant spin-glass garnet ferrite $\text{Lu}_3\text{Fe}_5_{-2x}\text{Co}_x\text{Si}_x\text{O}_{12}$ thin films", Masaki Adachi, Munetoshi Seki, Hiroyasu Yamahara, Hidekazu Nasu and Hitoshi Tabata, Appl. Phys. Express 8, 043002-1~5 (2015)

2) "High-Temperature Terahertz Absorption Band in Rare-Earth Gallium" M. Adachi, H. Matsui, M. Seki, H. Yamahara and Hitoshi Tabata, PhysRevB.91.085118(2015)

3) "スピンゆらぎの物理基盤とデバイス構築" 田畑 仁、第62回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム散逸ゆらぎ制御ナノ電子フォトン系の理論とデバイス構築、2015/03/11(招待講演)

4) "Strong optical reflection of rare-earth garnets in the terahertz regime by reststrahlen bands" Masaki Adachi, Hiroyasu Yamahara, Shunsuke Kawabe, Hiroaki Matsui, and Hitoshi Tabata, PhysRevB.89.205124(2014)

5) "Highly spin-polarized current in Co-substituted Fe_3O_4 epitaxial thin films at room temperature" M. Takahashi, T. Oshima, H. Yamahara, M. Seki and H. Tabata, J. Appl. Phys. Vol.116, No.21, 213907-1-5 (2014)

特許

5) ゆらぎ発振器、ゆらぎ発振システム、観測装置、及び制御システム、堀田育志、神吉輝夫、浅川直紀、河原敏雄、川合知二、田畑仁、4875161号、2011.12.02

6) 確率共振リング装置、確率共振リングネットワーク装置、学習記憶忘却装置、及びアトラクター選択装置、浅川直紀、堀田育志、神吉輝夫、河原敏男、川合知二、田畑仁、5154166号、2012.12.14 受賞

7) 関 宗俊、山原 弘靖、田畑 仁、第35回(2013年度)応用物理学会優秀論文賞(応用物理学会) 2013.07.12

8) 田畑 仁、第8回(2014年度)フェロー表彰、酸化物およびナノバイオ融合エレクトロニクス研究(応用物理学会) 2014.09.17 指導学生受賞(足立真輝)

9) 46th Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2014), Young Researcher Award

10) 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ優秀学生修了表彰、2015年3月

11) 東京大学大学院工学系研究科長賞(最優秀) 2015年3月

12) 東京大学総長賞 2015年3月

【ホームページ等】

<http://www.bioxide.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>