

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21200060

研究課題名（和文） 生体機能に学ぶナノ材料応用と生体機能模倣デバイスの創出

研究課題名（英文） Bio-functional application of nano-electronic materials and creation of bio-mimetic devices

## 研究代表者

神吉 輝夫 (KANKI TERUO)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：40448014

研究成果の概要（和文）：雑音により情報伝達能力を向上させる原理は「確率共鳴」と呼ばれており、この原理をエレクトロニクス材料開発に取り入れ、活用することによって、生体のようにノイズを利用した情報伝達が行えると考えている。本研究では、電圧印加で非線形的な電気応答を示す二酸化バナジウム（VO<sub>2</sub>）薄膜の確率共鳴特性を調べ、ノイズによる信号情報伝達が可能であることを示した。また、VO<sub>2</sub>単相膜内には、並列した閾値チャンネルが自然に存在しており、入出力信号相関比の向上をもたらしていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：The signal detection ability sometimes enhances by the addition of noise, which is called stochastic resonance (SR). In this research, we succeeded in enhancement of the ability of signal transfer by the addition of noise using non-linear response of VO<sub>2</sub> thin films. In addition, the SR behavior in the experimental results corresponded with the simulated SR behavior with multiple parallel units. This suggests that effective multiple channels should naturally exist in a VO<sub>2</sub> thin film. This achievement has fully potential to novel information processors using noise as bio-systems.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2010年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2011年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
総計	22,700,000	6,810,000	29,510,000

研究代表者の専門分野：酸化物エレクトロニクス

科研費の分科・細目：（分科）プロセス工学/応用物理学・工学基礎

（細目）生物機能・バイオプロセス/応用物性・結晶工学

キーワード：新機能電子材料、酸化物エレクトロニクス、生体機能工学

## 1. 研究開始当初の背景

（1）概要・・・現代エレクトロニクスデバイスは、“高速”で“精密”な情報処理を行うため、ノイズの影響に負けない大きな電力を供給する必要がある。また、ナノテクノ

ロジーによる微細化の進展は、半導体デバイスの超高集積化を可能にしてきたが、熱擾乱などによるノイズが攪乱要因になり、精細な情報処理動作の限界に至っている。一方で、生体システムに目を向けると、従来デバイスと

は対照的に、室温の熱ノイズを受け入れ、積極的に活用することによって、極めて低いエネルギー消費により信号を伝播し、高度かつ柔軟な情報処理機能を実現している。ノイズの排除に最大限のエネルギーを費やし、緻密なものが良いとされてきた従来概念に代わり、今後のグリーンイノベーションに資するエレクトロニクス展開の一つとして、生体システムに学ぶ意義は十分にある。

本研究テーマでキーワードとしている「確率共鳴」は、雑音を利用することによってシステムパフォーマンスを向上させる現象で、多くの生体活動において極めて重要な役割を果たしており、生体の感覚器をはじめ姿勢制御、脳にいたる様々な箇所での現象が発見され、数理モデルやコンピュータシミュレーションを中心として、国内外で研究が進められてきた。応用面では、ノイズ下での微弱信号検出という特徴を活かして、ノイズに埋もれた画像修復への用途も期待されているが、リアルタイムな情報検出、低消費電力化は、コンピュータプログラムでは限界があり、元来生体システムが発達させてきた自然にありふれた環境ノイズ活用による省エネルギー動作には程遠かった。

そこで、真の意味で確率共鳴をエレクトロニクスに応用するためには、現在あるテクノロジーの延長線上にシステムを構築するのではなく、これまでに蓄積された生体機能の研究から、エレクトロニクス応用できる重要な原理や機能をつかみ有望な電子材料の研究から行うべきであると考えている。

そのような観点に立ち、本研究では、電子材料分野サイドから、確率共鳴の原理を用いた新規信号伝達材料・デバイス化を試みた。

(2) 確率共鳴の原理と電子材料への適応・・・確率共鳴の基本的な物理的描像について、ある安定ポテンシャルに存在する粒子に対して、微弱信号とノイズが加算された場合を考える。一般的なモデルは、双安定ポテンシャル  $V(x)$  中のブラウン運動を記述するランジュバン方程式が用いられる。系が過減衰を受ける場合には、

$$dx/dt = -dV(x)/dx + S(t) + \sqrt{D} \xi(t) \quad (1)$$

$$V(x) = -a/2 x^2 + b/4 x^4 \quad (2)$$

と表すことができる。 $S(t)$ は、微弱信号であり、 $\xi(t)$ はノイズ(確率の変動力)、 $D$ はノイズ強度を示す。今、微弱信号  $S(t)$ の影響を受け、ポテンシャル  $V(x)$ が時間変動すると、系の有効ポテンシャルは、

$$V(x,t) = -a/2 x^2 + b/4 x^4 + S(t) \quad (3)$$

となる。例えば、 $S(t) = \sin(\omega t)$ の微弱信号が系に印加されているとき、 $V(x,t)$ の時間変動は、

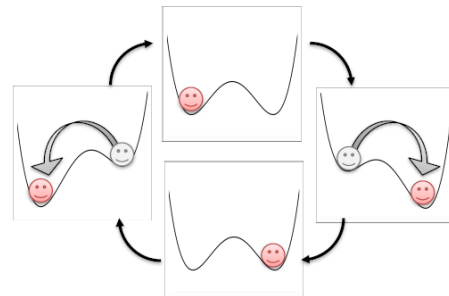


図1 双安定ポテンシャルに微弱周期信号が重畳した場合のポテンシャル揺動

図1のようになる。

ノイズがない場合は、ポテンシャル変動は微弱なので、粒子はポテンシャル障壁(閾値)を乗り越えることができないが、ノイズを加えていくとノイズと微弱信号が合致して跳躍することができ他方の安定ポテンシャルに移ることができる。ある適度なノイズ強度

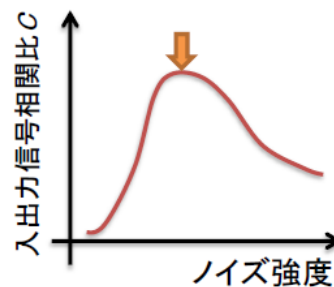


図2 典型的な確率共鳴特性

の時に、この非線形応答は、周期信号と同期し共鳴強度が最大となる(図2)。

これが、確率共鳴である。この確率共鳴を電子材料で実現するためには、非線形な電気応答特性を持つことであり、このような非線形型応答素子を多数並列に並べることで、入出力信号相関比(C)は、向上することが知られている(Collinsモデル)。

## 2. 研究の目的

本研究目的は、生体システムの自律性・柔軟性・ロバスト性を可能にする根本原理を「確率共鳴」に見出し、電子物性の知見を取り入れて、生体機能を模倣した今までにない新たな機能材料・素子を創製することである。

材料開発の面から生体機能模倣素子を研究することは次世代エレクトロニクスを展開する上での大きなブレークスルーに繋がると考えている。確率共振素子を構築するための重要な基本構成は、閾値判別するコンパレータ、ノイズを発生するノイズ源である。これら二つの要素を同時に持ち合わせ、高い効率で動作する材料が確率共振素子を創製する上で望ましい。このような観点から、強相関電子系酸化物 VO<sub>2</sub> の持つ巨大物性に着目した。VO<sub>2</sub> は、室温を超えた 70-80°C 付近に数桁にも及ぶ電気伝導性の変化を起こす材料であり、ある閾値電圧で絶縁体から金属に相転移する(図3)。

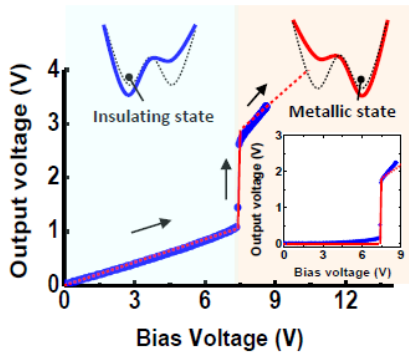


図3 VO<sub>2</sub> の絶縁体-金属相転移による非線形電気応答

この巨大非線形応答を利用することによって高効率で動作する確率共振素子の創製を可能にすると考えている。本研究では、VO<sub>2</sub> の確率共振特性の評価を行い、酸化物リソグラフィ技術を用いて微細化構造体を作製し、多数の素子を並列に並べることにより、入出力信号相関比の増大と、小型・低駆動電圧で動作する機能素子の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

パルスレーザーデポジション法を用いて、VO<sub>2</sub> 薄膜を、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)、TiO<sub>2</sub>(001)単結晶基板上に酸素圧 1.0 Pa、基板温度 350 °C で作製した。電気伝導特性の温度変化計測はカンタムデザイン社製 PPMS を用いて行った。また、確率共振特性は、時系列パルス信号、ノイズを発生させるためにエヌエフ社製ファンクションジェネレータ WF1946B、及び WF1974 を用いた。データ収集においては LabVIEW (ナショナルインスツルメンツ社製) で自作したプログラムを用いた。VO<sub>2</sub> 薄膜の電極間ギャップをマイクロ・ナノメートルサイズでコントロールするために、メタルマスクと原子間力顕微鏡 (AFM)、及びナノインプリントリソグラフィ法を用いた。

測定の設定アップについて、図4に示す。外部信号発生器とノイズジェネレータを VO<sub>2</sub>

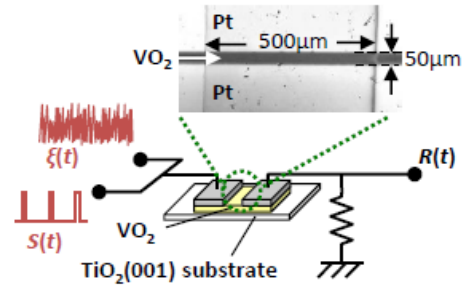


図4 測定セットアップ概略図

薄膜に接続し、入力  $S(t)$  と出力信号  $R(t)$  をモニタする測定システムである。

### 4. 研究成果

上記で示した測定システムにおいて、100 Hz の矩形波信号と、ホワイトノイズを VO<sub>2</sub> 薄膜に印加し、ノイズ強度を徐々に変化させると、適度なノイズ強度で入力信号波をより良く再現できていることが図5(b)によりわかる。

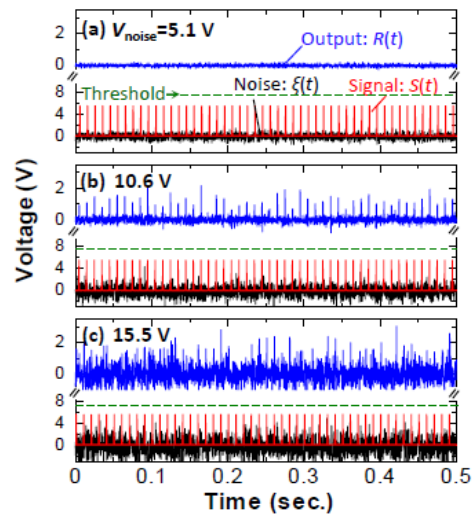


図5 ノイズ強度変化による  $R(t)$  適度なノイズ(b)のとき  $R(t)$  は、入力信号周期をより良く再現する。

ノイズ強度に対して入出力相関比  $C$

$$C = \frac{\frac{1}{t_M} \int_0^{t_M} [S(t) - \bar{S}(\bar{t})][R(t) - \bar{R}(\bar{t})] dt}{\sqrt{\frac{1}{t_M} \int_0^{t_M} [S(t) - \bar{S}(\bar{t})]^2} \sqrt{\frac{1}{t_M} \int_0^{t_M} [R(t) - \bar{R}(\bar{t})]^2}}$$

により、評価すると、図6にあるように釣鐘型の典型的な確率共鳴曲線が得られた。

この確率共鳴特性を評価するために、並

列型確率共鳴モデル (Collins モデル) を適用し、コンピュータシミュレーションを行った。

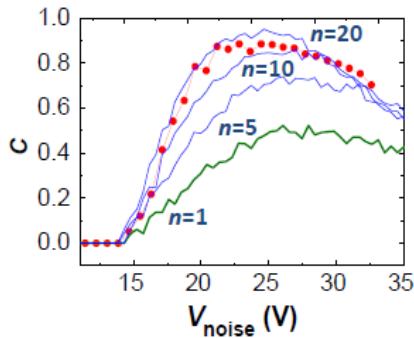


図6 VO<sub>2</sub> 薄膜の確率共鳴特性 (赤丸) 緑線(n=1)、青線(n=5-20)はシミュレーション

独立したノイズを印加した閾値系を並列に並べ (図7)、実験と同様の微弱矩形波を入力することにより、確率共鳴特性をシミュレートした。並列数 (n) が増加することにより、Cが増大する典型的な Collins モデルを再現している。VO<sub>2</sub> 薄膜の実験結果は、シミュレーションの n=10~20 に相当し、VO<sub>2</sub> 薄膜内に複数の並列チャネルが存在していることを示唆している。

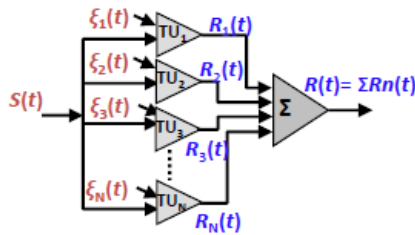


図7 並列型確率共鳴シミュレーション概要図。閾値ユニット(TU)を並列に並べ独立ノイズを印加

この VO<sub>2</sub> のマルチ並列チャネルの存在の直接確かめるために、閾値を越えて、金属相になったところを、光学顕微鏡により VO<sub>2</sub> の表面観察を行った (図8)。

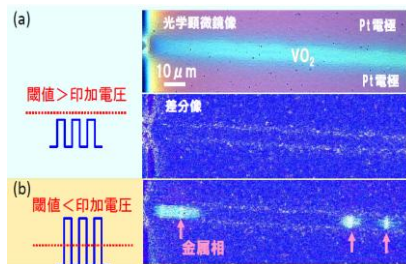


図8 VO<sub>2</sub> 薄膜表面の光学顕微鏡像。金属相と絶縁体相の反射率の違いから区別できる。閾値以上の電圧印加時に複数の金属パスが出現していることがわかる(b)

閾値電圧を超えた時に発生する金属相が数マイクロメートルサイズの幅をもつマルチパスとして自然形成されていることが分かり、単一 VO<sub>2</sub> 薄膜がマルチネットワーク型の確率共鳴特性を示すことが分かってきた。この結果は、人工的に VO<sub>2</sub> コンパレータを並べることなく入出力信号相関比が大きくなることを意味しており、非常に有難い特性である。

また、VO<sub>2</sub> 素子サイズの縮小による、閾値電圧の低減化の実験においては、実際にコンパレータ駆動電圧を従来の 14.0 V から 4.5 V にまで低減できた (図9)。

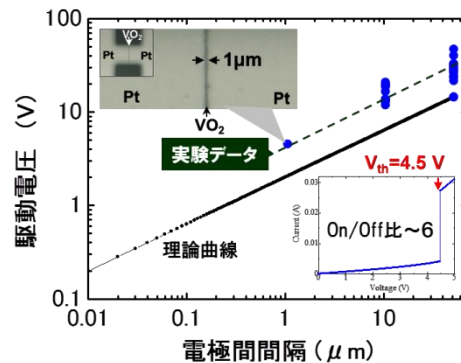


図9 VO<sub>2</sub> 薄膜の閾値電圧 v s 電極間距離

今後は、さらに駆動電圧を低減し、VO<sub>2</sub> 薄膜中にある強相関電子系特有の不均質電荷ドメインの熱ゆらぎをノイズ源として利用し、低電圧駆動型確率共振素子の構築を目指したナノ微細加工プロセスを開発する。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① T. Kanki, H. Takami, S. Ueda, A. N. Hattori, K. Hattori, H. Daimon, K. Kobayashi and H. Tanaka, Identifying valence band structure of transient phase in VO<sub>2</sub> thin film by hard X-ray photoemission, *Phys. Rev. B*, 査読有、Vol. 84、2011、085107(5)
- ② T. Kanki, Y. Hotta, N. Asakawa, T. Kawai and H. Tanaka、Noise-driven signal transmission using nonlinearity of VO<sub>2</sub> thin films, *Appl. Phys. Lett.*、査読有、Vol.96、2011、242108(3)
- ③ 神吉 輝夫、田中 秀和、ノイズを利用した新概念情報伝達電子材料の創出、大阪大学 低温センターだより、査読無、Vol.155、2011、pp.5-9

[学会発表] (計 19 件)

- ① H. Takami, K. Kawatani, **T. Kanki**, S. Ueda, K. Kobayashi, H. Tanaka, Modulation of Metal-Insulator Transition Temperature in W-doped VO<sub>2</sub> Thin Films : Toward Mott devices, ICCE-19、2011年7月28日、WYNDHAM Bund East Hotel (上海・中国)
- ② **神吉 輝夫**、堀田 育志、浅川 直紀、川合 知二、田中 秀和、遷移金属酸化物の巨大金属-絶縁体転移を利用したマルチチャンネル確率共鳴、第 58 回応用物理学関係連合講演会、2011 年 3 月 25 日、神奈川工科大学 (神奈川県)
- ③ **神吉 輝夫**、田中 秀和、酸化物ナノヘテロ構造における強相関電子ドメイン制御と巨大物性発現、第 58 回応用物理学関係連合講演会、2011 年 3 月 24 日、神奈川工科大学 (神奈川県)
- ④ **T. Kanki**、New functional devices using nonlinear electric response of oxide materials、NSF-MEXT US/Japan Young Scientists Symposium on Nanomanufacturing、2010年12月10日、大阪大学 (大阪)
- ⑤ **T. Kanki**、Y. Hotta、N. Asakawa、T. Kawai and H. Tanaka、Noise-driven signal transmission using nonlinear property of VO<sub>2</sub> thin films、2010 MRS Fall meeting、2010年12月1日、Hynes Convention Center、(Boston・US) (招待講演)
- ⑥ **神吉輝夫**、ノイズを利用した新概念情報伝達ナノ材料の創出、財団法人国際高等研究所プロジェクト「単分子エレクトロニクス」の現状と近未来実現へ向けての中核体制構築」第二回研究会、2010 年 10 月 22 日、国際高等研究所 (奈良県)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

- ① 名称：制御信号生成法、その装置、及び移動体駆動制御装置  
発明者：堀田 育志、**神吉 輝夫**、浅川 直紀、川合 知二  
権利者：大阪大学  
種類：特許  
番号：PCT/JP2009/063771  
出願年月日：21 年 9 月 24 日  
国内外の別：国外
- ② 名称：コンパレータ、ノイズジェネレータ、及び確率共振素子  
発明者：**神吉 輝夫**、堀田 育志、浅川 直紀、川合 知二、田中 秀和  
権利者：大阪大学  
種類：特許  
番号：PCT/JP2009/067261

出願年月日：21 年 10 月 2 日

国内外の別：国外

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神吉 輝夫 (KANKI TERUO)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：40448014

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

浅川 直紀 (Naoki Asakawa)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：24655093

堀田 育志 (Yasushi Hotta)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30418652