



Title	ノイズを活用した新概念情報伝達電子材料の創出
Author(s)	神吉, 輝夫; 田中, 秀和
Citation	大阪大学低温センターだより. 2011, 155, p. 5-9
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/10702
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

ノイズを活用した新概念情報伝達電子材料の創出

産業科学研究所 †神吉 輝夫（内線4281）

田中 秀和（内線4280）

† E-mail: kanki@sanken.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

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、^[1]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。

そのような観点に立ち、本稿では、電子材料分野サイドから、ノイズ活用（確率共鳴）についての根本的な意味合いを概観し、確率共鳴の原理と電子材料への適応について述べる。そして、現在研究を進めている酸化物単一電子材料で確率共鳴現象を観測した例を紹介し、最後にまとめと今後の展開について述べたい。

2. 確率共鳴の原理と電子材料への適応

ノイズによる信号の伝達、或いは生体システムのパフォーマンスを向上させる現象は“確率共鳴”と呼ばれ、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、^[2]数理モデル^[3]やコンピュータシミュレーション^[4]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^[5]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。

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、

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

$$V(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4 \quad (2)$$

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（確率的変動力）、 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、

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

となる。例えば、 $S(t) = \sin t$ 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

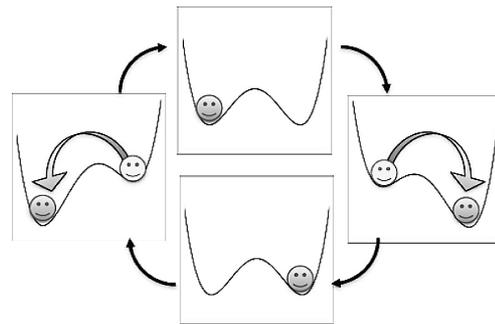


図1 双安定ポテンシャルに微弱周期信号が重畳した場合のポテンシャル揺動。

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、カーボンナノチューブ、或いはGaAsベースの電界効果トランジスタ（FET）等^[6・9]で観測されている。また、上述の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）^[3]

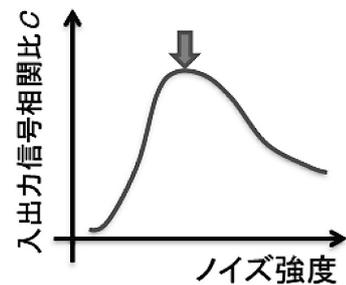


図2 典型的な確率共鳴特性。

3. 酸化物電子材料VO₂薄膜の確率共鳴現象^[10]

これまで電子材料で確率共鳴を実現するには、電界効果トランジスタ、pn接合等、接合素子を作製する必要があったが、本研究では、ある閾値電圧で絶縁体から金属に相転移する二酸化バナジウム（VO₂）という単一材料の非線形電気応答（図3）を利用して実験を行った。まず、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VO₂薄膜に接続し、入

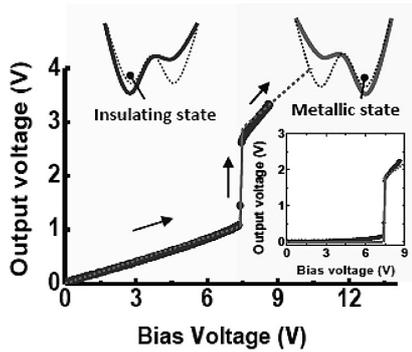


図3 VO₂の絶縁体-金属相転移による非線形電気応答。

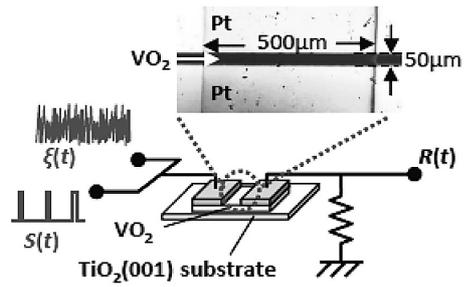


図4 測定セットアップ概略図。

力 ($\xi(t)$) と出力信号 ($R(t)$) をモニタする単純な測定システムである。

100 Hzの矩形波信号と、ホワイトノイズをVO₂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。ノイズ強度に対して入出力相関比C

$$C = \frac{\frac{1}{t_M} \int_0^{t_M} [S(t) - \overline{S(t)}][R(t) - \overline{R(t)}] dt}{\sqrt{\frac{1}{t_M} \int_0^{t_M} [S(t) - \overline{S(t)}]^2} \sqrt{\frac{1}{t_M} \int_0^{t_M} [R(t) - \overline{R(t)}]^2}} \quad (4)$$

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)^{3]}を適用し、コンピュータシミュレーションを行った。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。VO₂薄膜の実験結果は、シミュレーションの $n=10 \sim 20$ に相当し、VO₂薄膜内に複数の並列チャンネルが存在していることを示唆している。現在は、VO₂のマルチ並列チャンネルの存在を直接確かめる研究を行っている。

その実験結果の一端を紹介すると、閾値以上の電圧印加により金属相転移したときの様子を、絶縁体相と金属相の光反射率の違いを利用して、光学顕微鏡により観察したところ、複数の金属パスが存在していることが分かった (図8)。この結果は、上記のVO₂確率共鳴特性には複数の並列チャンネルが関わっていることを強く支持するものである。

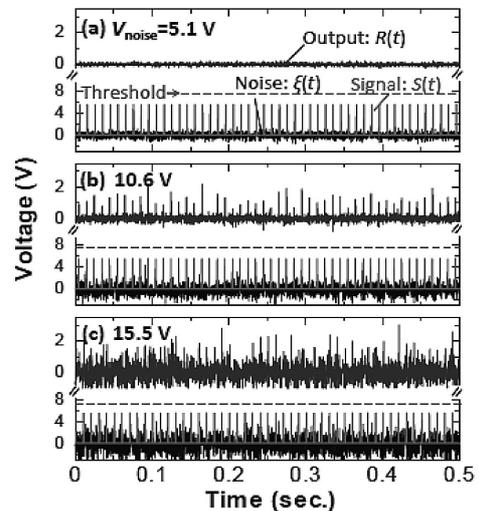


図5 ノイズ強度変化による $R(t)$ 。適度なノイズ(b)のとき $R(t)$ は、入力信号周期をより良く再現する。

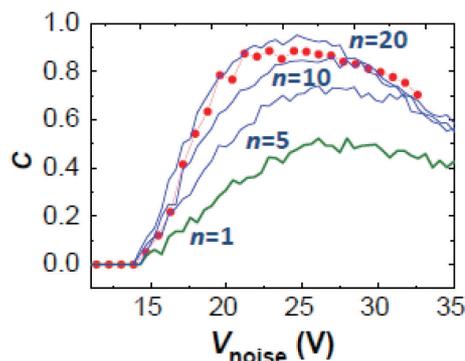


図6 VO₂薄膜の確率共鳴特性(赤丸)。緑線(n=1)、青線(n=5-20)はシミュレーション。

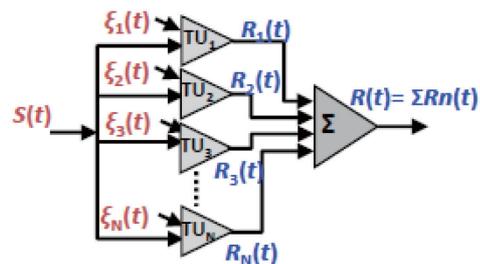


図7 並列型確率共鳴シミュレーション概要図。閾値ユニット(TU)を並列に並べ独立ノイズを印加。

4. まとめと今後の展開

本稿では、確率共鳴の概念を電子材料研究に応用する提案と、実際に非線形電気応答するVO₂薄膜の確率共鳴特性について述べた。今後の展開において、閾値電圧の低減は重要な課題であり、VO₂内部ノイズを利用したモノリシック確率共鳴素子の創出につながると考えている。閾値電圧は、ほぼ電界強度に比例することが分かっているので、酸化物ナノ微細加工を通じて電極間距離を狭くすることで、低減できる。試算では、100 nmギャップの電極間で、20 mV程度の閾値電圧となり、VO₂内部ノイズの活用レベルにまで到達が可能である。

また、確率共鳴はノイズ環境下の信号伝播に利用するだけでなく、メモリ・判断^[11]、ノイズチューナブル同期発振^[12]というような工学的機能をも見出ししており、一層の多機能展開が期待できる。

我々を取り巻く環境はノイズにあふれており、これを活用しない手はない。環境共生に優れた生物に学び、エレクトロニクスを発展させることができれば、究極のグリーンテクノロジーを得ることができるかと確信している。

謝辞

本研究は、大阪大学“飛翔30若手プログラム”、及び科研費「新学術領域(課題提案型)」(21200060)の助成を得て行われた。本成果は、川合知二特任教授(産研)、浅川直紀准教授(現群馬大学工学部)、堀田育志准教授(現兵庫県立大学工学部)との共同研究によるものである。

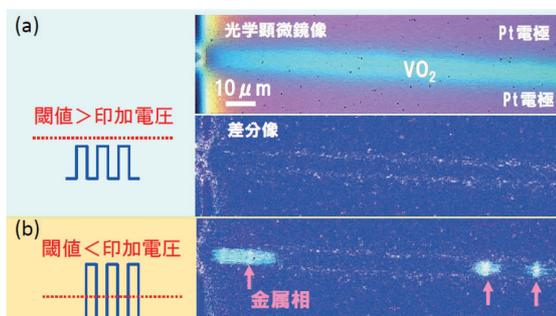


図8 VO₂薄膜表面の光学顕微鏡像。金属相と絶縁体相の反射率の違いから区別できる。閾値以上の電圧印加時に複数の金属パスが出現していることがわかる(b)。

参考文献

- [1] 例えば、柳田 敏雄, 現代化学430, 23-29 (2007).
- [2] L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung and F. Marchesoni, Rev. Mod. Phys. 70, 233 (1998).
- [3] 例えば、J. J. Collins, C. C. Chow and T. T. Imhoff, Nature 376, 236 (1995).
- [4] 例えば、M. Riani and E. Simonotto, Phys. Rev. Lett. 72, 3120 (1994).
- [5] B. Kosko and S. Mitaim, Neural Networks 16, 755 (2003).
- [6] I. Y. Lee, X. Liu, B. Kosko and C. Zhou, Nano Letters 3, 1683 (2003).
- [7] Y. Hakamada, Y. Ohno, K. Maehashi, K. Inoue and K. Matsumoto, Appl. Phys. Exp. 4, 045102 (2011).
- [8] S. Kasai, K. Miura and Y. Shiratori, Appl. Phys. Lett. 96, 194102 (2010).
- [9] A. Samardak, A. Nogaret, N. b. Janson, A. G. Balanov, I. Farrer and D. A. Ritchie, Phys. Rev. Lett. 102, 226802 (2009).
- [10] T. Kanki, Y. Hotta, N. Asakawa, T. Kawai and H. Tanaka, Appl. Phys. Lett. 96, 242108 (2010).
- [11] N. Asakawa, Y. Hotta, T. Kanki and T. Kawai, Phys. Rev. E 79, 021902 (2009).
- [12] Y. Hotta, T. Kanki, N. Asakawa, H. Tabata and T. Kawai, Appl. Phys. Exp. 1, 088002 (2008).