

## 4 ノイズの有効活用

# 電子デバイスにおいて排除すべき存在のノイズを有効活用するための研究

ノイズは多くの場合不要なものであり、特に電子デバイスの動作には悪い影響があるため排除すべき存在であることが多い。NTT 物性科学基礎研究所（以下、物性研）フロンティア機能物性研究部 ナノデバイス研究グループでは、このノイズが持つエントロピーを電子デバイスで有効に活用するための研究を行っている。

### ノイズが持つエントロピーを電子デバイスで有効活用

電子デバイスにおいてノイズはエラーの原因となるため、ノイズを排除する、またはノイズの影響を受けないよう対策を取るのが一般的だ。一方、生物系ではノイズが有効に活用されている。たとえば、ザリガニはノイズがある環境下の方が外敵や餌となる生物を敏感に発見できる。こうした生物の例を参考に、ノイズの持つエントロピーを有効に利用する研究が行われている。

実際にノイズをデバイス動作に利用する手法もすでに知られている。

「ある『しきい値』より強い信号だけを検出できるデバイスであっても、信号にノイズを加えるとそのノイズのアシストを受け、しきい値より小さいはずの信号を検出できます。この現象は『確率共鳴』と呼ばれています。ノイズがあることによって信号検出の性能が上がるということです。このようにノイズの持つ情報、すなわちエントロピーを利用するための研究を行っています。」（知田氏）

### 熱ノイズから電流を得られることは実証済

物性研は電子のランダムな熱運動から電流を得る実験に成功したことを、2017年に発表している。シリコンデバイス内でランダムな方向に動く電子から一方向に動く電子のみを選別することで、電流を発生させている。室温で電子1つの検出が可能な技術を有する物性研ならではの研究であった。

「この研究は、熱力学の分野において『マクスウェルの悪魔』と呼ばれる問題を説明するのに役立つものでした。ノイズのエントロピーを有効活用する研究を行うきっかけにもなったと言えます。」（知田氏）

### ノイズを利用する際のエネルギー効率を知るための研究

ある電子デバイスがノイズのエントロピーから得られるエネルギーの物理的な上限を知り、実際に得たエネルギーがどの程度かを正確に計測できれば、ノイズを有効活



NTT 物性科学基礎研究所  
フロンティア機能物性研究部  
ナノデバイス研究グループ  
主任研究員 知田 健作氏

用する研究を進める上での指標として役立つ。物性研ではまずそうした指標を得ることにつながる基礎研究に取り組んでいる。

最近の研究成果の1つが、室温においてノイズを整流して電荷を蓄積し、その電荷を正確に計測できるデバイスの作製だ。

「作製したのは、印加したノイズが整流され電荷として蓄積される仕組み（図1）を持つナノデバイスで

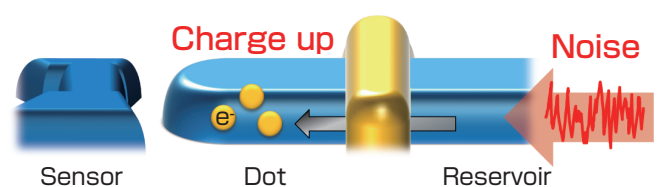


図1 ノイズから電荷を蓄える仕組み

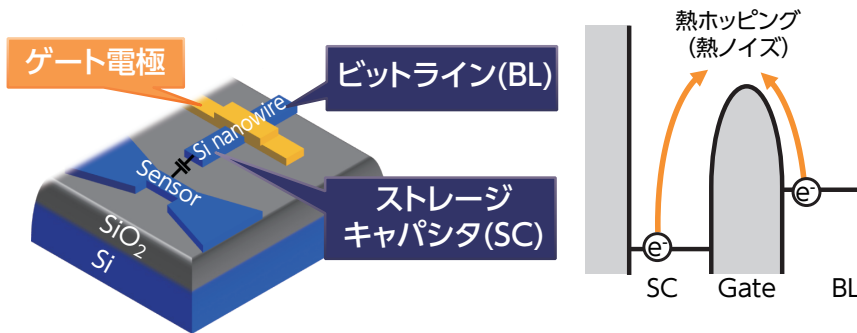


図2 ノイズの持つ情報をキャパシタに保持するデバイスの構造

す。電池を充電するのと同じことで、その電荷を後からエネルギーとして利用できることを実験により示すことが、この研究の目的でした。」(知田氏)

### 電子数を正確に測定できる ナノデバイス

作製したデバイスより具体的な構造を図2に、その電子顕微鏡写真を図3に示す。シリコン基板上に絶縁体としてSiO<sub>2</sub>の膜があり、その上にシリコン層による回路を配置したSOI構造によるシリコン・ナノデバイスだ。

「シリコン細線の上に付いているゲート電極に負の電圧を印加すると、直下の電子が追い出されます。この動作によりシリコン細線をビットライン（以下、BL）と、電荷を貯めるストレージキャパシタ（以下、SC）からなるDRAMと同じ構造にすることができます。このDRAM構造内では熱ノイズにより熱ホッピングという現象が起こり、電子がSCとBLの間をランダムに行き来しています。」(知田氏)

SCに電子を蓄えるほど、電子同士の反発によって、センサに電流が流れにくくなる構造であるため、センサ電流を観測することでSC内の

電子の数を知ることができる。

### 室温において単一電子レベルの ノイズ計測を実現

単一電子レベルのノイズを計測する実験はそれまでも行われていたが、極低温の環境で行われることが多かった。実験対象以外のノイズ源の影響を受けてしまうためだ。低温であるほど意図しないノイズを抑えやすいため、他の研究グループでは極低温の環境で実験を行っている。

物性研が室温での実験に成功した理由について、知田氏は次のように述べている。

「どのような物質にも意図しない欠陥や不純物などに起因した『1/f ゆらぎ』の特性を持つノイズの影響があります。室温で単一電子を計測する実験では、このノイズの影響が問題となります。実験対象（SCとBLを行き来する単一電子の運動）以外の要因によるノイズの影響をなるべく受けないようにする方法の1つが、不純物が含まれない純度の高いシリコンを使い、高い精度を持つナノデバイスを作製することです。我々には長年にわたり蓄積してきた微細加工のノウハウがあるため、そのようなナノデバイスを作ることが可能でした。高度な微細加工技術に

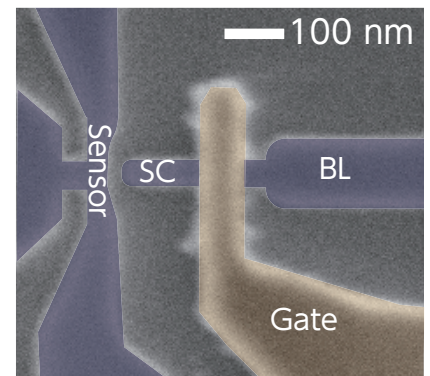


図3 作製したデバイスの電子顕微鏡写真

より自らデバイスを作製し、理論の実証や仮説の検証に取り組めることが我々の強みになっています。」

### 蓄積される電子数の確率分布まで 知ることが可能

図4左のグラフはセンサ電流が変化する様子を観察した実験の結果だ。電流が飛び飛びの値を示していることがわかる。その値が電子1つの運動に対応しているため、SCに蓄積された電子の数を知ることができる。これによりSC内電子数の確率分布（図4中央のグラフ）を得ることができた。

「この確率分布における平均からSCの局所電位を、分散の大きさからSCの局所温度を知ることができます。すなわち分散からノイズの熱エネルギーを算出できるということです。単一電子レベルの計測でなくてもSCの電位まではわかりますが、電子数の確率分布から局所温度を知るようなことはできません。単一電子レベルのノイズ計測により、こうしたナノデバイス内の詳細な情報を得られるようになりました。」(知田氏)

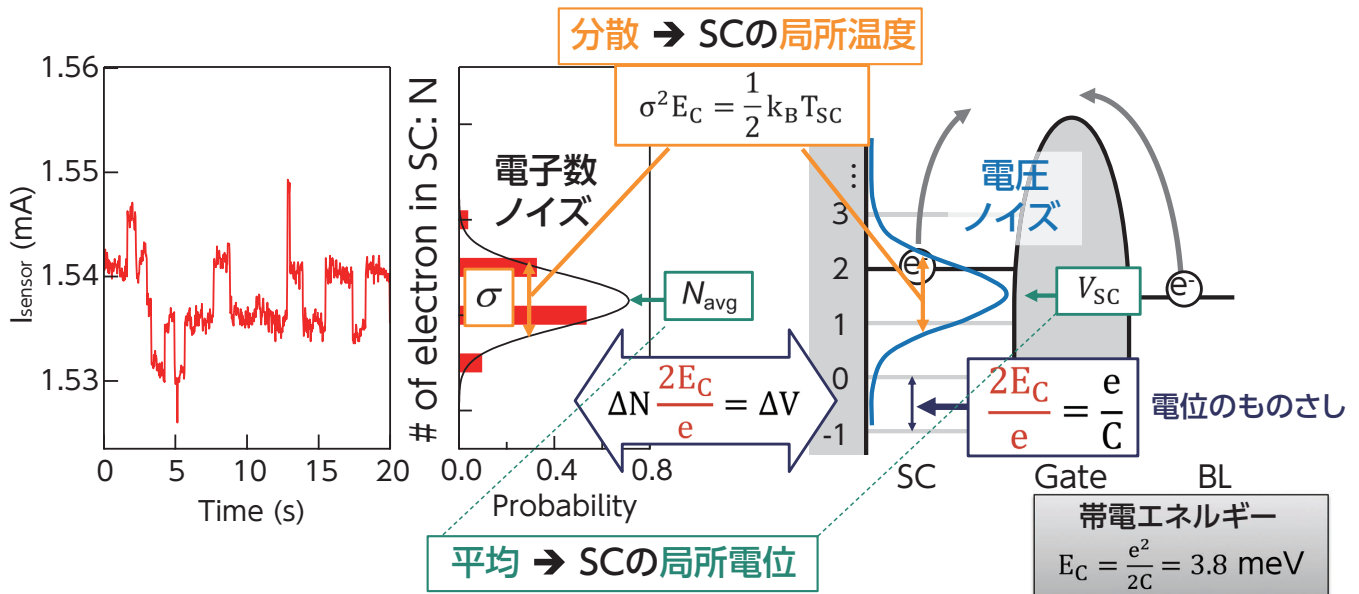


図4 単一電子レベルの計測により局所温度まで把握可能に

### ノイズが多いほど電荷が蓄積されることを確認

図5左のグラフはデバイスに外部からノイズを加えながらセンサ電流を観測した結果だ。図5右のグラフはセンサ電流のヒストグラムで、数字は外部ノイズの振幅を電圧で示したものだ。ノイズの振幅が大きいほどセンサ電流が小さくなっていることがわかる。

このことにより、外部ノイズの振幅が大きいほどSCにより多くの電荷が蓄積されることが確認できた。

### ノイズのエントロピーを限界まで利用することを目指す

物性研ではノイズからエネルギーを得る際のエネルギー効率の限界を実験的に示すこと、またその限界になるべく近い効率で実際にエネルギー変換を行うことに取り組んでいく考えだ。ナノデバイスを使う実験を通じて得た知見は、より大きなデバイスでノイズを活用する際にも役

立つとして、知田氏は今後の研究活動に対する思いを、次のように述べている。

「生物物理学の分野ではノイズをうまく利用した生き物の仕組みを物理的に解明する研究が行われています。このような知見をナノデバイスに応用したいと考えています。

また、コンピュータを始めとした電子機器の中はノイズで溢れています。電子機器が動作することによって発生する熱や電気的なノイズを有効利用できるデバイスを作りたいと考えています。ただし従来のノイマン型コンピュータはノイズでエラーが発生してしまうためその実現は難しいかも知れません。その点でニューロコンピュータや量子コンピュータのような非ノイマン型コンピュータならばノイズを有効に活用できるのではないかと期待しています。

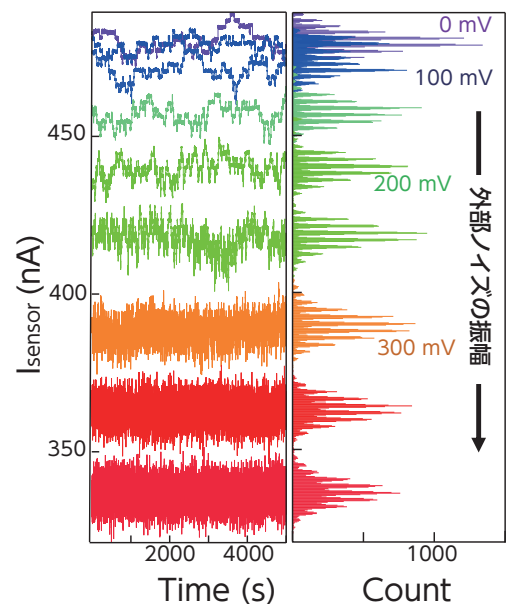


図5 ノイズと蓄積される電荷の関係

「このほか、確率共鳴を利用することでノイズのエントロピーを利用した高感度なセンサを実現できる可能性があります。生き物に倣いながら、ノイズを有効活用できる電子デバイスの実現に向けた研究をしていきたいと考えています。」