

## IoT 利用を目指した 2 次元層状環境発電素子

東京大学工学系研究科マテリアル工学専攻 教授 長汐 晃輔

本研究は、普遍的に存在する環境エネルギーから電気エネルギーを獲得し、IoT デバイスに独立した形で電力供給を可能とする材料開発を提案するものであり、CO<sub>2</sub> を増加させない技術である。前半では供給源として「振動」に、後半では「太陽光」に着目した研究を紹介する。

これまで精力的にエネルギーハーベスティングに関する研究が進められてきたが、IoT 向け自立電源の中でも特に商用センサデバイス用に要求される「100 μW」までは厳しい状況である(図 1a)。これは、材料/デバイス/システムと応用までを階層化して考えた場合、100 μW に到達するためには、材料自身にブレークスルーが必要であることを示している。ここで、PZT に代表される既存の材料では到達できない理論的に最も高い圧電定数( $d \times g$ )が 2 次元層状材料である SnS で報告されていることに気づいた。これは、結晶構造がヒンジ型をしているため応力印加時に伸びやすいという特徴に由来し、従来のセラミクス強誘電体には無い特徴に由来する。しかしながら、SnS の高い圧電特性は実証されていない。本研究では、SnS の高い圧電特性を実証し、100 μW を達成することを目的として行った。我々は、成長炉を立ち

上げ結晶性のよい単層 SnS の成長に成功し(図 1b, *Nanoscale*, 2020, 12, 23274.)、電界付与による分極反転を実験的に示し(図 1c)、強誘電体であることを世界で初めて示した(*Nature Commun.*, 2020, 11, 2428.)。さらに、歪導入機構を構築し、アーチ状に上下に曲げることで SnS 層に引張及び圧縮歪を導入し、機械振動発電を実証した(図 1d, *固体物理*, 2023, 58, 605.)。環境発電により一般的なセンサデバイ

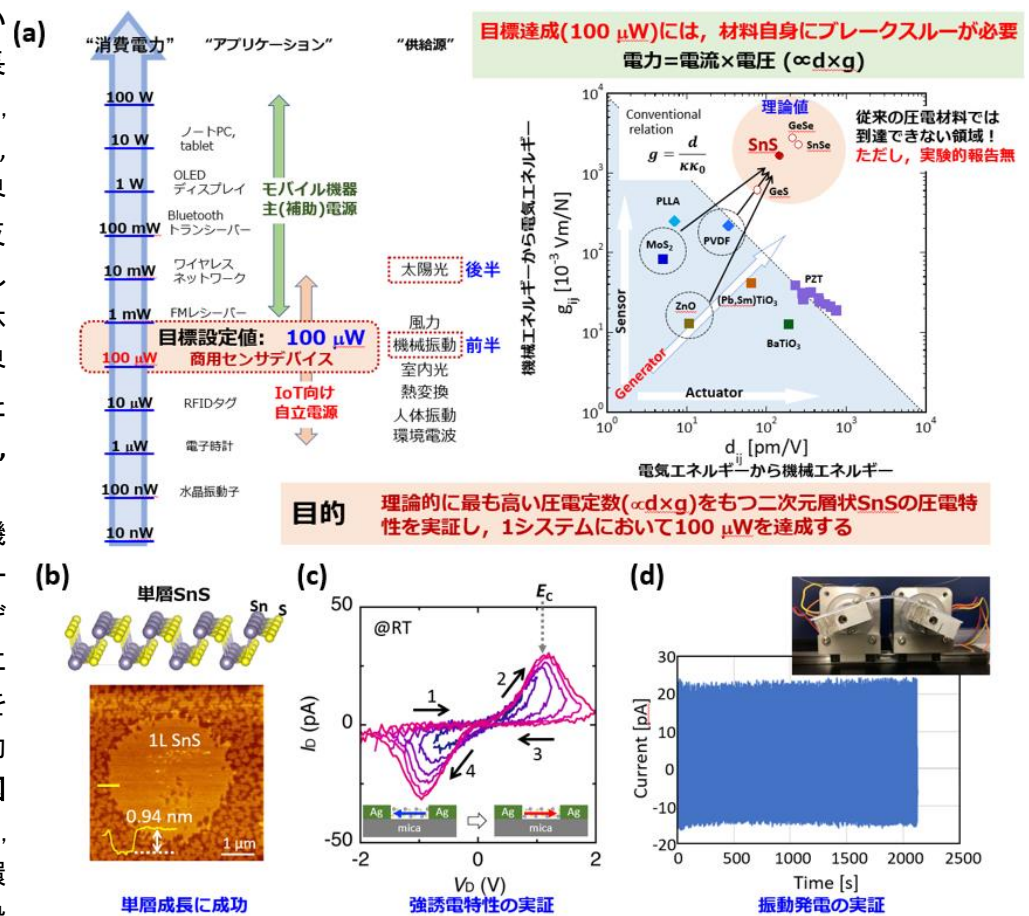
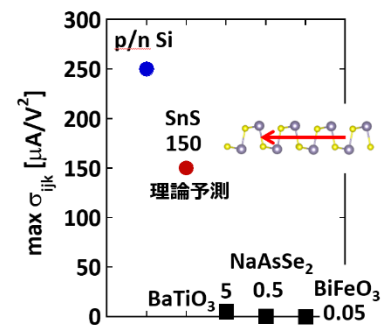


図 1 (a) 研究背景と目的. (b) 単層 SnS の AFM 像. (b) 分極反転によるショットキー障壁変化による電流変調. (c) 引張歪印加による発電.

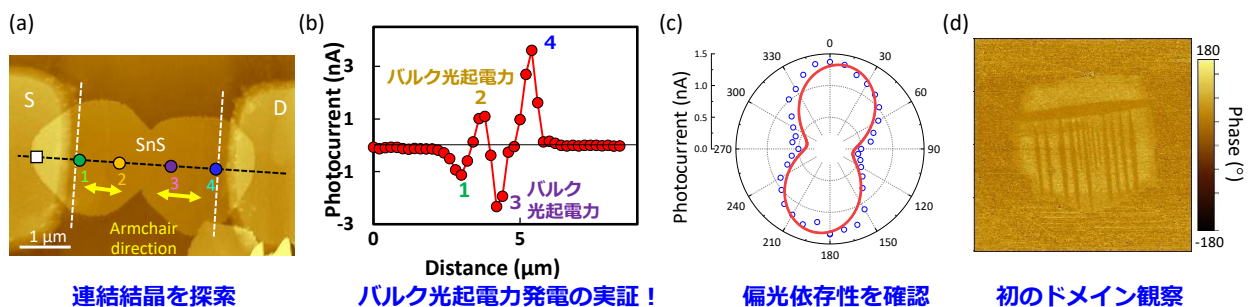
スを動作させることが可能となる第一歩を実証した本研究は、科学的な観点で世界をリードしているだけでなく社会へのインパクトが非常に大きい。

次に「太陽光」を供給源とする研究を紹介する。従来の強誘電材料において中心対称性を持たないバルク光起電力効果が研究され、光照射時に誘起されるシフト電流が起源であることが明らかにされてきた。層状物質群においても研究が活発化しているが、殆どの材料において理論的に予測されるバルク光起電力効果による発電量が低いことが課題であった。最近、**図 2** に示すように、SnS においてシリコン太陽電池に匹敵する値が報告され注目を集めているが、実験的には全く研究が進んでいない。この理由は、上述のように SnS 強誘電相を制御して成長できるグループが世界的にいなかったからである。我々の一日の長のある成長技術を用いて、バルク光起電力効果の実証を試みた。



**図 2** 様々な材料におけるバルク光起電力発電による発電量。

面内分極の揃った反転対称性を有する強誘電体  $\beta'$  相を原子レベルで平坦かつ絶縁体である  $h$ -BN 上に成長させ、リソグラフィ技術によりソース/ドレイン電極を形成した。ここで、現時点でまだ結晶が小さいため、アームチェア方向が揃った2つの結晶を探し電極を作製した(**図 3a**)。488 nm の光を 1  $\mu$ m のスポット径で導入し、ラインスキャンをして光電流測定を行った。金属電極から離れた位置 2,3 において、光電流のピークを観測し(**図 3b**)、さらに入射光の偏光依存性が理論計算結果と良く一致したことから(**図 3c**)、バルク光起電力効果であると結論付けられる。加えて、圧電応答顕微鏡(PFM)により線状の強誘電ドメイン構造および、直交したドメイン構造を観察した(**図 3d**)。界面エネルギーの観点から、180°回転の双晶界面を考えることで結晶内のマクロな分極方向を良く説明できることが分かった。以上の結果は、SnS のバルク光起電力発電を世界で初めて実証したものであり、科学的に非常に高い評価を得ている。また、従来の3次元酸化物強誘電体と異なり、層状面内分極のドメイン構造を観察しており、分極反転機構等の解明が今後重要である。



**図 3** (a) 2つの SnS 結晶が連結したデバイスの AFM 像, (b) (a)の黒破線上に沿って得られた光電流, (c) 2の位置での光電流の偏光角度依存性, (d) PFM によるドメイン観察。

### 【実用化が期待される分野】

エネルギー・環境分野, 特に自立電源化を促進することによる IoT 社会実現に寄与する。