



2021 年 12 月 9 日

報道関係者各位

慶應義塾大学

## 柔らかく伸び縮みする半導体デバイスで世界最高周波数の駆動に成功

### ー未来のウェアラブルは伸縮性・ワイヤレスー

慶應義塾大学理工学部電気情報工学科専任講師の松久直司とスタンフォード大学化学工学科ポスドク研究員（研究当時）の Dr. Simiao NIU、教授の Prof. Zhenan BAO らの研究グループは、柔らかく伸び縮みする半導体デバイスを世界で初めて 13.56 MHz（非接触の交通カードでも用いられる周波数）もの高周波で動作させることに成功しました。これまで伸縮性半導体デバイスの動作周波数は 100 Hz 程度に留まっていたので、10 万倍もの飛躍的な性能向上となります。

薄いゴムシートのような柔らかい電子デバイスは、皮膚にピタッと貼り付けて装着できる着心地などに優れた次世代ウェアラブルデバイスとしての活用が期待されています。重要な課題の一つにどのように電源供給するかという問題がありましたが、本研究成果の高周波ダイオードデバイスにより、無線で電力伝送・通信ができるようになりました。さらに本研究で開発した伸縮性半導体用電子材料はセンサや発光素子などへの転用も可能なため、柔らかいウェアラブルデバイス全体の性能向上が見込まれ、実用化が一步近づきました。

本研究成果は 2021 年 12 月 8 日、「Nature」に掲載されました。

#### 1. 本研究のポイント

- ・伸び縮みする半導体デバイスで世界初の 13.56 MHz での高周波動作に成功。
- ・開発のキーは、伸縮性と電気特性（移動度、導電性、仕事関数など）を両立する様々な材料設計。
- ・次世代ウェアラブルデバイスのプロトタイプとして、無線で伸縮性センサの信号を伸縮性ディスプレイに表示するシステムを実現。

#### 2. 研究背景

ウェアラブルデバイスによるヘルスケアシステムは、装着するだけで長期にわたって様々な生体情報を取得できるので病気の早期発見・予防などに役立ちます。その重要性は、新型コロナウイルスなどの感染症や高齢化の進行によりますます明らかになっています。今身の回りにあるウェアラブルデバイスは腕時計や指輪のような硬くて小さい形をしています。次世代のウェアラブルデバイスとして、薄いゴムシートのような柔らかい電子デバイスが期待されています。我々の体と同じように柔らかく、皮膚にピタッと密着するので、体全体に長時間装着しても違和感なく高精度な生体情報を取得することができます。さらに柔らかい電子デバイスは、仮想・拡張現実(VR・AR)用の次世代インターフェースやロボットの電子人工皮膚としての応用も期待されています。

柔らかい電子デバイスを実現するために、近年、世界中の研究者が元々電気を流さないゴムのような柔軟な材料を、伸縮性の導体や半導体（※1）などの電子材料に作り替えていく研究を進めています。松久も世界最高導電率の印刷できる伸縮性導体材料の開発などに取り組んできました[参考文献 1]。最近、生体のような柔らかさを示しながら、電気特性は最新の半導体材料とほぼ同じの高性能な伸縮性半導体材料が発明されました[参考文献 2]。これを用いて様々な伸縮性半導体デバイス（※2）

が実現されてきました。しかしながら、これらの駆動周波数は 100 Hz 程度と遅く、MHz 以上の周波数で動く現代の電子デバイスには遠く及ばず社会での活用の大きな壁となっていました。

### 3. 研究内容・成果

本研究では、伸縮性半導体デバイスで 13.56 MHz もの高周波数で駆動できる伸縮性ダイオードを世界で初めて実現しました（図 1）。この高周波伸縮性ダイオードは元の長さの 1.5 倍の長さに伸ばしても高周波動作し、繰り返しの伸長を与えても高い電気特性を維持できます。これまでの駆動周波数の記録は 100 Hz 程度だったので、10 万倍もの性能向上となり飛躍的な進歩と呼べます。今回達成した 13.56 MHz という周波数は、効率よく無線で電力伝送や通信を行うことができるため応用上非常に重要で、交通系 IC カードや携帯電話の無線充電装置などにも用いられています。開発の決め手になったのは、高周波駆動用に精密にチューニングされた様々な新しい伸縮性電子材料です。例えば伸縮性半導体材料では、元々ガラスのように割れやすい高分子半導体の化学構造の中に、柔らかいシリコンゴム(※3)の化学構造を少しだけ取り込むことで高い電気特性と伸縮性を実現しています。他にも導電性高分子材料や、金属ナノ材料の一種である銀ナノワイヤといった電子材料も、伸縮性を付与すると同時に電気特性が高周波動作の要件を満たすように本研究のために新しく設計されました。



図 1. 本研究で開発した高周波伸縮性ダイオード。（左）構造。（右）写真。

さらに開発した高周波伸縮性ダイオードを用いて、柔軟かく伸び縮みするセンサ・ディスプレイ・アンテナと集積化したシステムを作製しました（図 2）。このシステムは、衣服に仕込まれたアンテナからワイヤレスで給電され、センサの信号をリアルタイムでディスプレイ素子の色変化として表示することができます。本システム全体を大きく伸長しても壊れることはなく、次世代のウェアラブルデバイスには着け心地だけでなく優れた機械的耐久性も期待できます。



図 2. ワイヤレスで駆動できる伸縮性センサ・ディスプレイシステム。

#### 4. 今後の展開

本研究で実現が可能になったワイヤレス給電・通信できる柔らかい次世代ウェアラブルデバイスは、装着感もよく高精度な生体信号が得られるだけでなく、日常生活の中で勝手に衣服や机などから充電もできます。さらに本研究で開発された新しい伸縮性の電子材料は他の半導体デバイスにも応用できるので、伸び縮みして壊れにくい太陽電池や発光ディスプレイなどの伸縮性電子デバイス全体の改良が今後加速していくことが予測されます。エレクトロニクスが硬くて壊れやすいフォームファクターを捨て、我々の体により近い柔らかさ・しなやかさを獲得することで、ヘルスケア、スポーツ、VR/AR、ロボットなど、様々な分野で応用されていくことが期待されます。

#### <参考文献>

1. N. Matsuhisa, *et al.*, “Printable elastic conductors by in situ formation of silver nanoparticles from silver flakes” *Nature Materials* **8**, 834-840 (2017). doi: <https://doi.org/10.1038/nmat4904>
2. J. Xu, *et al.*, “Highly stretchable polymer semiconductor films through the nanoconfinement effect” *Science* **355**, 59-64 (2017). doi: <https://doi.org/10.1126/science.aah4496>

#### <原論文情報>

英文タイトル: High-frequency and intrinsically stretchable polymer diodes

タイトル和訳: 高周波伸縮性高分子ダイオード

著者名: (†共同第一著者) Naoji Matsuhisa<sup>†</sup>, Simiao Niu<sup>†</sup>, Stephen JK O'Neill, Jiheong Kang, Yuto Ochiai, Toru Katsumata, Hung-Chin Wu, Minoru Ashizawa, Ging-Ji Nathan Wang, Donglai Zhong, Xuelin Wang, Xiwen Gong, Rui Ning, Huaxin Gong, Insang You, Yu Zheng, Zhitao Zhang, Jeffrey B.-H. Tok, Xiaodong Chen, Zhenan Bao\*

doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04053-6>

#### <用語説明>

※1 半導体: 電気の流しやすさを自在に制御することができる材料。電気と光を相互に変換させる機能も持つ。代表的なものにシリコン。

※2 半導体デバイス: 半導体を用いた電子部品の総称。IC チップやディスプレイの回路素子として重要なトランジスタや、ダイオード型素子（太陽電池、フォトダイオード、LED など）を含む。

※3 シリコンゴム: 柔らかくよく伸び縮みするゴム材料の一種で、スマートフォンケースや医療用のチューブなどに用いられている。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

---

#### ・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科 専任講師 松久 直司（まつひさ なおじ）

TEL : 045-566-1761 E-mail : [naoji@keio.jp](mailto:naoji@keio.jp) <https://www.naojimatsuhisa.com/>

#### ・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（澤野）

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

Email : [m-pr@adst.keio.ac.jp](mailto:m-pr@adst.keio.ac.jp) <https://www.keio.ac.jp/>