

超薄膜エレクトロニクスが拓く持続可能社会への挑戦



研究室紹介

福田 憲二郎*

Development of Ultra-Thin Electronics for Next-Generation Sustainable Society

Key Words: Flexible electronics, Organic photovoltaics, Active devices, Bio-integrated systems

はじめに

2025年4月より、大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻に着任いたしました福田憲二郎です。私は2011年に東京大学大学院にて博士号を取得後、山形大学の助教としてキャリアをスタートさせました。2015年からは理化学研究所にて研究員(2018年からは専任研究員)として研究活動に邁進してまいりました。長崎県出身の私にとって初となる関西での勤務ですが、本学の初代総長である長岡半太郎先生と同郷(長崎県大村市)であり、母校の長崎県立大村高等学校にも大変ご縁が深い歴史ある大阪大学の一員として、研究・教育活動に携わることができ大変嬉しく、身の引き締まる思いであります。

現在の社会を支える電子デバイスの多くは、シリコンなどの硬い無機材料で作られています。これに対し、プラスチックや生体組織などの有機材料・高分子材料は優れた柔軟性を持ち、従来の無機エレクトロニクスでは実現不可能なフレキシブル・ソフトなシステムを構築可能です。

当研究室(有機フレキシブルシステム領域)では、有機材料を中心とした材料群を用いて、柔軟性という特徴を生かした新たなデバイスおよびシステム構築を目指す研究を行っています。本稿では、当研究室で取り組んでいる最先端の研究内容とその社会的展望について紹介いたします。

超柔軟な次世代太陽電池の開発と基礎物性

当研究室の中核をなすテーマの一つが、ペロブスカイト太陽電池や有機薄膜太陽電池に代表される「次世代太陽電池」の超薄膜化・超柔軟化に関する研究開発です(図1a)。当研究室では、厚さ10 μm 以下(基板・封止層含め総厚4~5 μm 、機能層合計1 μm 未満)の素子を「超薄型」OPVと定義し、研究を進めています。フィルム状物体の曲げにくさを示す曲げ剛性は、厚さ3乗に比例します。この強力な3乗則こそが、デバイスを10 μm 以下の超薄型領域にすることで劇的な柔軟性と生体・曲面への優れた追従性が得られる物理的根拠です。このような圧倒的な柔軟性のために、衣服に張り付けて重量を感じさせない発電、などの形態を実現することができます(図1b)¹。

近年、OPVの電力変換効率(PCE)は20%に迫る急速な向上を遂げています。さらに、素子界面に酸化銀(AgO_x)正孔輸送層を自己形成させる技術により、水中に4時間浸漬しても初期効率の89%を維持し、洗濯機での洗浄試験にも耐える前例のない防水・環境耐久性を実現しました(図1c)²。

自立型生体センサシステムへの展開

これらの超薄型太陽電池と高感度な有機センサ(有機電気化学トランジスタや有機光電変換素子)を一体化させることで、外部電源や嵩張る配線を一切必要としない「自立駆動型生体モニタリングシステム」を実現しています(図1d)^{3,4}。

全溶液プロセスで成膜された超薄型有機太陽電池、有機発光ダイオード、および有機光探知器を3次元積層・直接接合した自立型脈波(PPG)センサは、皮膚表面に違和感なく密着し、体動ノイズを大幅に低減しながら高品質な脈拍信号を正確に計測可能です。また、有機トランジスタと組み合わせた自己電



* Kenjiro FUKUDA

1983年6月生まれ
東京大学大学院 工学研究科 物理工学専攻
博士課程(2011年)
現在、大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報通信工学専攻 教授 博士(工学)
TEL: 06-6879-7757
E-mail: fukuda@eei.eng.osaka-u.ac.jp

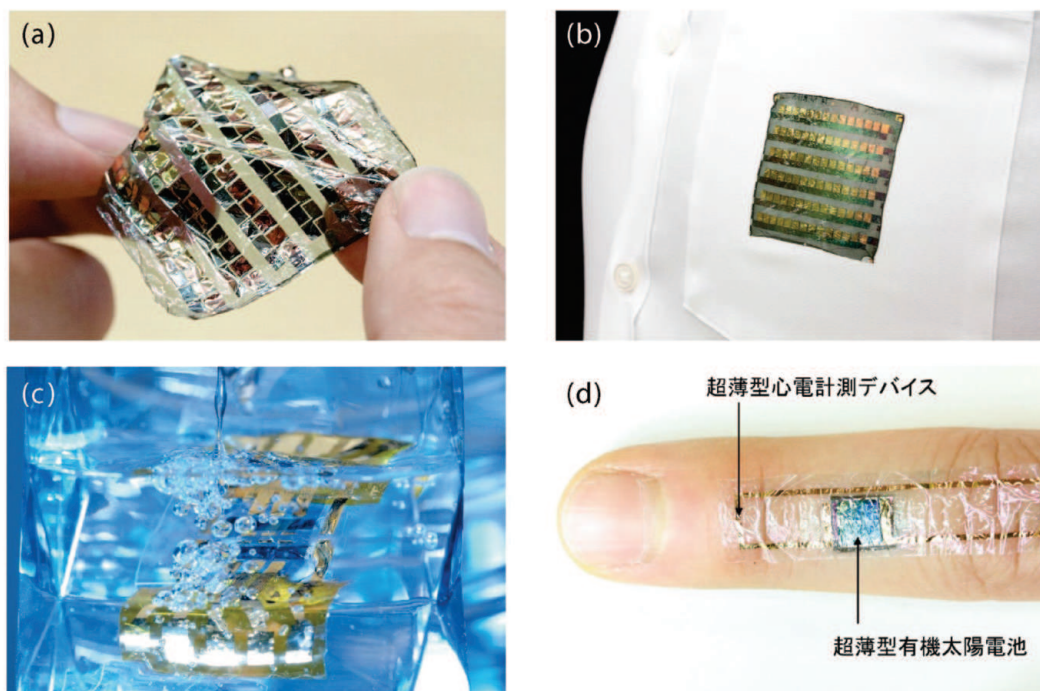


図1 (a) 超薄型有機太陽電池、(b) 衣服に張り付けたところ、(c) 水中でも駆動する、(d) 超薄型のセンサと集積化した自立駆動型生体モニタリングシステム。

源型心電 (ECG) センサでは、外部電源由来のノイズを排することで、高S/N比 (25.9 dB~40.02 dB) での生体信号リアルタイム計測に成功しています。

低温・常温での直接接合技術

超薄膜・多機能エレクトロニクスを実用化・高密度集積化する上で、接着剤等を用いずに薄型フィル

ム同士や異種デバイス間を高い導電性と柔軟性を保ったまま高精度に配線・接続する「直接接合技術」の確立が不可欠です。

当研究室では、水蒸気プラズマを用いて金 (Au) 電極表面を活性化し、常温・大気圧下で直接接合する「水蒸気プラズマ支援金接合」技術を独自に開発しました (図2)⁵⁻⁶。熱や加圧、接着層を一切必要とし

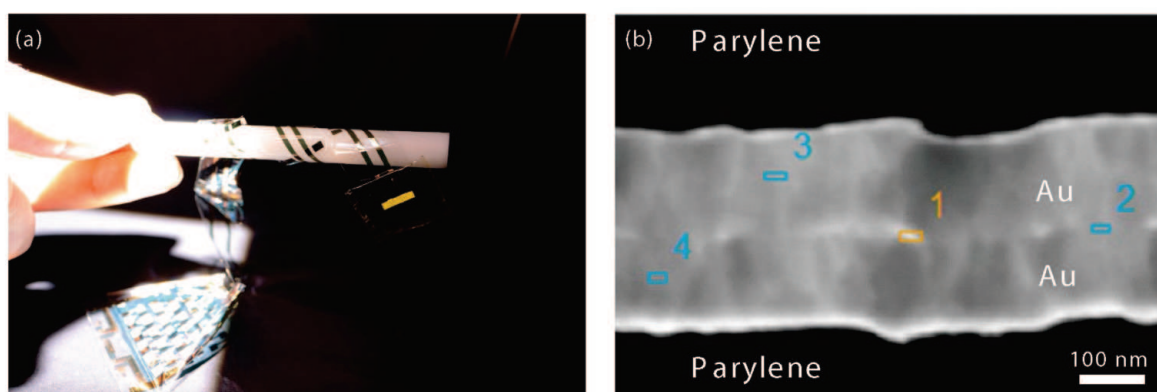


図2 (a) 低温・常温での金属直接接合技術で集積化した超薄型有機太陽電池と有機LED、(b) 接合した金電極の界面の断面SEM像。

ないため、熱に弱い超薄膜高分子フィルムや有機半導体層を損傷することなく、数 μm レベルの微細配線接合が可能です。さらに近年では、プラズマ処理と水の可塑剤効果を組み合わせた「ハイブリッド直接接合」へと進化させ、金電極のみならず高分子基板(パリレン)領域を含む全面を85℃の低温で直接融合・接合することに成功しました。これにより、接合部の曲げ半径0.5 mmという圧倒的な柔軟性と、10,000回の繰り返し屈曲に耐える強固な機械的・電気的信頼性を両立しています。

曲げ試験プロトコルの国際標準化と評価指標

柔軟な太陽電池の研究開発が世界的に加速する一方で、「高柔軟性」や「高耐久性」を客観的に比較・評価するための統一的な規格が存在せず、研究グループごとに異なる曲げ半径や評価条件で報告されているという課題がありました。

この課題を解決するため、筆者らは世界の主要研究機関と連携し、フレキシブル太陽電池の機械的性能を評価するための「国際標準曲げ試験プロトコル」を提案いたしました⁷⁻⁸。本プロトコルでは、印加歪み($\epsilon=1\%$)および曲げサイクル数($N_{\text{BC}}=1,000$ 回)を基本基準として定め、曲げ軸の向き(電流方向との平行・垂直関係)や素子・基板厚みに応じた精密な歪み計算モデルを明示することを推奨しています。さらに、印加歪み(ϵ)、曲げサイクル数(N_{BC})、変換効率変化率(ΔPCE)を包括的に統合し、異種デバイス間の機械的疲労耐性を単一の数値で定量比較できる新指標「フレキシブル太陽電池疲労因子F」を考案いたしました。国際データベース等への導入を通じて、分野全体の標準化・信頼性向上に貢献しています。

おわりに

本稿では、大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻における超薄膜エレクトロニクスの最新の研究取り組みについて紹介いたしました。装着していることすら意識させない「電子皮膚」や連続バイオモニタリングシステムなど、「薄く、軽く、柔らかい」デバイスがもたらす革新は、医療・ヘルスケア分野をはじめとする持続可能な社会の実現に向けた全く新しい解決策を提供する可能性を秘めています。今後も基礎研究から応用展開、標準化活動

まで広く取り組んでまいります。

参考文献

1. X. Xu, K. Fukuda, A. Karki, S. Park, H. Kimura, H. Jinno, N. Watanabe, S. Yamamoto, S. Shimomura, D. Kitazawa, T. Yokota, S. Umez, T.-Q. Nguyen and T. Someya: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 115 (2018) 4589.
2. S. Xiong, K. Fukuda, K. Nakano, S. Lee, Y. Sumi, M. Takakuwa, D. Inoue, D. Hashizume, B. Du, T. Yokota, Y. Zhou, K. Tajima and T. Someya: *Nat. Commun.*, 15 (2024) 681.
3. S. Park, S. W. Heo, W. Lee, D. Inoue, Z. Jiang, K. Yu, H. Jinno, D. Hashizume, M. Sekino, T. Yokota, K. Fukuda, K. Tajima and T. Someya: *Nature*, 561 (2018) 516.
4. L. Sun, J. Wang, H. Matsui, S. Lee, W. Wang, S. Guo, H. Chen, K. Fang, Y. Ito, D. Inoue, D. Hashizume, K. Mori, M. Takakuwa, S. Lee, Y. Zhou, T. Yokota, K. Fukuda and T. Someya: *Sci. Adv.*, 10 (2024) eadk9460.
5. M. Takakuwa, K. Fukuda, T. Yokota, D. Inoue, D. Hashizume, S. Umez, and T. Someya: *Sci. Adv.*, 7 (2021) eabl6228.
6. M. Takakuwa, D. Inoue, L. Sun, M. Yamamoto, S. Umez, D. Hashizume, T. Itoh, K. Fukuda, T. Someya and T. Yokota: *Adv. Mater.*, 37 (2025) 2417590.
7. K. Fukuda, L. Sun, B. Du, M. Takakuwa, J. Wang, T. Someya, L. F. Marsal, Y. Zhou, Y. Chen, H. Chen, S. R. P. Silva, D. Baran, L. A. Castriotta, T. M. Brown, C. Yang, W. Li, A. W. Y. Ho-Baillie, T. Österberg, N. P. Padture, K. Forberich, C. J. Brabec and O. Almora: *Nat. Energy*, 9 (2024) 1335.
8. L. Sun, K. Fukuda, R. Guo, L. A. Castriotta, K. Forberich, Y. Zhou, T. Someya, C. J. Brabec and O. Almora: *Adv. Funct. Mater.*, 35 (2025) 2422706.