

丸文研究奨励賞 受賞者



福田 憲二郎

理化学研究所 開拓研究本部 染谷薄膜素子研究室
専任研究員

柔軟な超薄有機太陽電池の 高効率化・安定化の研究

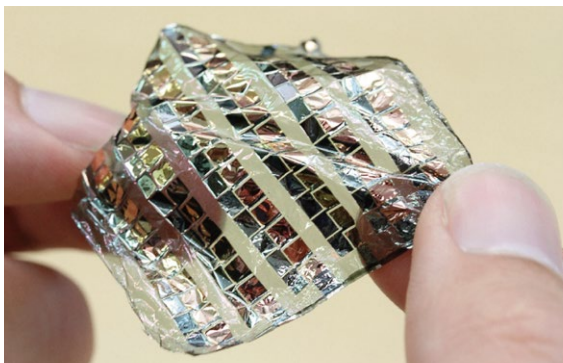
超柔軟・超軽量な電源から広がる未来のエレクトロニクス

研究の背景

有機太陽電池は次世代の太陽電池として近年世界中で活発な研究が進む研究分野です。プラスチックなどのフレキシブル基板上に作製可能であり柔軟性に富むこと、印刷手法によって大面積を高スループットで形成可能であること、という2つの大きな特徴から、従来のシリコン系太陽電池では実現困難な電力供給の形が実現可能であり、ウェアラブルエレクトロニクス向けの電力供給技術としての使用が検討されています。

有機太陽電池の技術課題は大きくエネルギー変換効率の向上と、大気環境での使用・保管安定性の改善の2点が挙げられます。新しい材料開発によって有機太陽電池のエネルギー変換効率(PCE)は急速に向上しており、2022年1月現在硬いガラス基板を利用して18.2%に到達しています。また、大気中での駆動安定性についても、ガラス基板・ガラス封止を行うことで30年以上安定的に駆動可能であるという報告がなされており、ガラス基板を使用した場合には実用化に向けた目途が一定程度見えてきている段階に到達しています。

図1 超柔軟な有機太陽電池



基板や封止膜を含めた厚さが3μmで、クシャクシャにしても壊れない。

有機太陽電池の究極の形態として、我々は厚さ1μmの超薄型基板を利用した超柔軟な有機太陽電池の研究を進めてきました。基板や封止膜を含めた全体の膜厚が数μmという超薄型有機太陽電池はくしゃくしゃに曲げても壊れず、皮膚や衣服などに貼り付けても装着感を感じさせずに使用することができます。このような究極の薄さ・軽さによって単位重さ当たりの発電量は数十W/gにまで到達します。このような特徴は社会のあらゆる場所にエレクトロニクスが存在する未来社会における電力供給の問題を解決する有望なアプローチになりえます。

しかしながら、このような超薄型の高分子フィルムを基板材料として使用すると、効率や安定性が著しく悪くなるという大きな課題が存在します。これはフレキシブル基板材料の低い熱安定性・高い熱膨張係数や、ガスバリア性の低さに起因した酸素・水分の発電層への侵入などが原因です。特に、基板の膜厚を薄くすることは熱安定性やガスバリア性を損なう要因となってしまうため、

太陽電池全体の厚みと効率・安定性トレードオフの関係を持っているという課題を抱えていました。

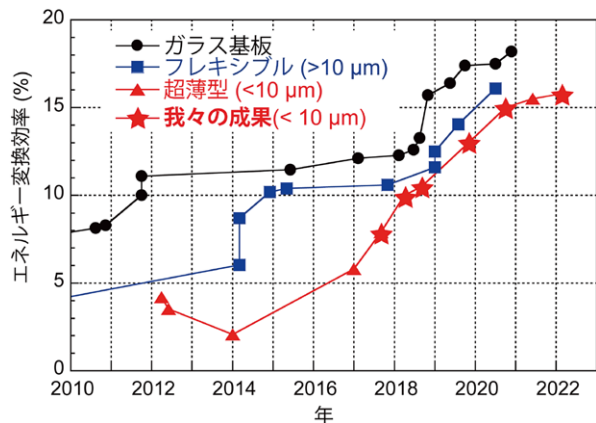
研究の成果

我々は基板や封止膜を含めた総膜厚3μmの超薄型有機太陽電池の性能向上と応用研究で世界最先端の成果を達成しています(図1)。具体的には、世界最高のエネルギー変換効率15.8%を達成しながら、伸縮性、水安定性、耐熱性を両立させ、それを電源として用いた皮膚貼り付け・自立駆動型の生体センサを実現しました。

1. エネルギー変換効率向上

研究着手当時(2015年)4.2%だった超薄型有機太陽電池のエネルギー変換効率をおよそ6年間で15.8%まで向上させることに成功しました[1]。この値は2022年1月時点、基板厚さ10μm以下の超薄型有機太陽電池での世界最高値です(図2)。このようなエネルギー変換効率の向上の力

図2 有機太陽電池のエネルギー変換効率向上の歴史



厚さ10μm未満の超薄型太陽電池で我々は世界最先端の効率を更新し続けている。

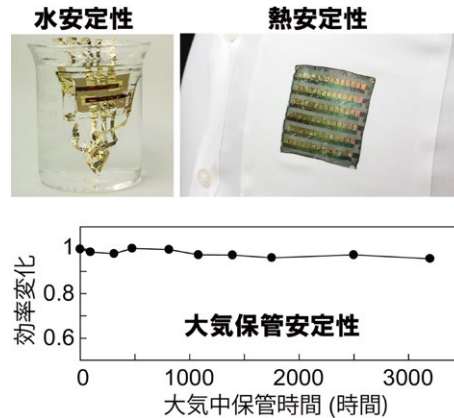
ギとなったのが、高耐熱・高平坦な超薄型高分子基板の開発と、新規電荷輸送材料の開発です。これらの新たな材料やプロセスによって、超薄型有機太陽電池のエネルギー変換効率は通常のフレキシブル有機太陽電池に匹敵する値を達成できるようになり、硬いガラス基板上の有機太陽電池と比しても遜色ない値に近づいています。

2. 環境安定性改善

超薄型有機太陽電池の効率を向上させながら、環境に対する安定性の改善を同時に達成しました。より具体的には、水中に120分浸漬しても性能劣化が5.4%という高い耐水性^[2]、100°Cの加熱を行っても全く性能劣化のない高い耐熱性^[3]、3000時間以上大気中暗所で保管しても性能劣化が5%以下^[4]、100回の繰り返し伸長を加えても性能劣化が3%という高い機械的安定性^[5]、という様々な環境要因に対する安定性を達成しています。

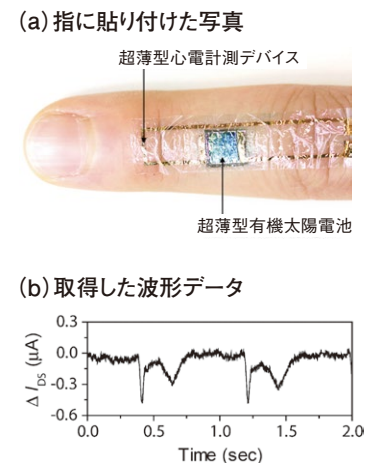
耐水性に関しては、超薄型基板をゴムでラミネーションする新しい構造により、伸縮可能性を維持しながら水に対する耐久性を圧倒的に改善することに成功しました。耐熱性に関しては、耐熱性に優れた低熱膨張係数の基板材料と、熱的に安定な発電層材料の使用に加え、高撥水フッ素系ポリマーと高ガスバリア性ポリマーの複合封止膜という二重封止膜のアイデアを組み合わせることで実現されました。これによって、ホットメルト手法による衣服貼付や、アイロン可能など、衣服上電源としてのアプリケーション応用の可能性を大きく広げることになりました(図3)。大気保管安定性に関して、上記の耐熱性に優れた発電層や基板材料という知見を手掛かりに、これまで100°C程度の加熱によって劣化していたホール輸送材料をさらに高温の150°Cで短時間処理することで、性能回復するという新しい知見を発見しました。この手法を用いることで、室温暗所で3000時間保管後の劣化が5%以下という、極めて安定な超薄型有機太陽電池を実現しました。

図3 超薄型有機太陽電池の安定性改善



水につけても壊れず、耐熱性が高いため加熱圧着フィルムを利用して衣服に貼り付けることも可能で、100日以上大気で保管してもほとんど劣化しない。

図4 超薄型有機太陽電池を利用した自立駆動型心電計測デバイス



3. 自立駆動・皮膚貼り付け型の生体センサ

超薄型有機太陽電池を電力源とした自立駆動・皮膚貼り付け型の生体センサを実証し、超薄型有機太陽電池がウェアラブルセンサ用の電力源として使用可能であることを実証しました(図4a)。有機太陽電池からの電力によってセンサを駆動させる、超薄型の自立駆動心電計測システムを構築しました。このデバイスを人間の指に貼り付けることで、外部電源なしに心電計測デバイスが駆動し、信号対雑音比25.9dBという高いシグナルノイズ(S/N)比での信号取得に成功しました(図4b)^[6]。

将来の展望

これまでに超薄型有機太陽電池の効率向上と安定性改善の取り組みを行い、実際

に皮膚貼り付け型センサ用の電力源として使用可能であることを実証してきました。今後は様々な光電子デバイスと集積化させることで、新しい電力供給の形が生み出す新たなエレクトロニクスの様式を提案できるような研究に注力したいと考えています。超柔軟・超軽量だからこそできるエレクトロニクスを示すことで、次世代社会の構築へ貢献することが期待されます。

謝辞

本研究は多くの方々のご支援・ご協力のもとに行われたものです。学生時代よりご指導いただきました東京大学染谷隆夫教授(現工学系研究科長および理化学研究所主任研究員)をはじめ、全ての研究室メンバー、国内外の共同研究者の先生方・企業の皆様に深く御礼申し上げます。

References (参考文献)

- [1] S. Xiong, K. Fukuda, S. Lee, K. Nakano, X. Dong, T. Yokota, K. Tajima, Y. Zhou, T. Someya, *Adv. Sci.*, 2105288 (2022).
- [2] H. Jinno, T. Yokota, M. Koizumi, W. Yukita, M. Saito, I. Osaka, K. Fukuda, T. Someya, *Nat. Commun.*, 12, 2234 (2021).
- [3] X. Xu, K. Fukuda, A. Karki, S. Park, H. Kimura, H. Jinno, N. Watanabe, S. Yamamoto, S. Shimomura, D. Kitazawa, T. Yokota, S. Umezue, T.-Q. Nguyen, and T. Someya, "Thermally stable, highly efficient, ultraflexible organic photovoltaics", *Pro. Natl. Acad. Sci.*, 115, 4589-4594 (2018).
- [4] Z. Jiang, F. Wang, K. Fukuda, A. Karki, W. Huang, K. Yu, T. Yokota, K. Tajima, T.-Q. Nguyen, and T. Someya, *Pro. Natl. Acad. Sci.*, 117, 6391-6397 (2020).
- [5] F. Qin, W. Wang, L. Sun, X. Jiang, L. Hu, S. Xiong, T. Liu, X. Dong, J. Li, Y. Jiang, J. Hou, K. Fukuda, T. Someya, and Y. Zhou, "Robust metal ion-chelated polymer interfacial layer for ultraflexible non-fullerene organic solar cells", *Nat. Commun.*, 11, 4508 (2020).
- [6] 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*, 551, 516-521 (2018).