

洗濯可能な超薄型有機太陽電池

—衣服貼り付け型の電源としての応用に期待—

要旨

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター（CEMS）創発ソフトシステム研究チームの福田憲二郎研究員（染谷薄膜素子研究室研究員、科学技術振興機構（JST）さきがけ研究者）、染谷隆夫チームリーダー（染谷薄膜素子研究室主任研究員、東京大学大学院工学系研究科教授）らの共同研究グループ[※]は、洗濯も可能な伸縮性と耐水性を持つ、超薄型有機太陽電池^[1]の開発に成功しました。

衣服に貼り付けることができる太陽電池は、生体継続モニタリングに向けたウェアラブルセンサーなどを駆動するための電源として重要な役割を果たします。このような太陽電池の実現には①高い環境安定性、②高いエネルギー変換効率（太陽光エネルギーを電力に変換する効率）、③機械的柔軟性、の三つの要素を同時に満たす必要があります。しかし、従来の有機太陽電池ではこれらを同時に満たすことは困難でした。

今回、共同研究チームは、超柔軟で極薄の有機太陽電池を作製し、大気中・水中の保管でも劣化なく動作させることに成功しました。この超柔軟な有機太陽電池は、厚さわずか1マイクロメートル（1 μ m、1,000分の1mm）の基板フィルムと封止膜を利用しており、曲げたり、つぶしたりしても動作します。このように超薄型でありながら、高いエネルギー変換効率と同時に高い耐水性を両立させることに成功しました。開発の決め手となったのは、高い環境安定性と高いエネルギー変換効率を両立した有機半導体ポリマー^[2]を極薄の高分子基板上に形成する技術です。さらに、超薄型有機太陽電池をあらかじめ引張させたゴムによって双方向から挟むことで、伸縮性を保持しながら耐水性が劇的に向上する封止を実現しました。120分間の水中浸漬でもエネルギー変換効率の低下は5%程度であり、また水滴をデバイス上へ滴下・一定時間保持しつつ約50%の伸縮を繰り返し行った際にも、エネルギー変換効率は初期の80%を保ちました。

本成果は、ウェアラブルデバイスや e-テキスタイル^[3]に向けた長期安定電源応用の未来に大きく貢献すると期待できます。

本研究は、英国の科学雑誌『Nature Energy』（9月18日付け：日本時間9月19日）に掲載されます。

なお、本研究は JST 戦略的創造研究推進事業個人型研究（さきがけ）「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」（研究総括：桜井貴康）の研究課題「ナノ膜厚ポリマー絶縁膜を利用した全印刷型基板レス有



「機集積回路の創成」(研究者：福田憲二郎)の一環として行われました。

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター

創発ソフトシステム研究チーム

研究員 福田 憲二郎 (ふくだ けんじろう)

(染谷薄膜素子研究室研究員、JST さきがけ研究者)

チームリーダー 染谷 隆夫 (そめや たかお)

(染谷薄膜素子研究室主任研究員、東京大学大学院工学系研究科教授)

大学院生リサーチ・アソシエイト 甚野 裕明 (じんの ひろあき)

特別研究員(研究当時) シャオミン・シュー (Xiaomin Xu)

特別研究員 ソンジュン・パク (Sungjun Park)

創発分子機能研究グループ

グループディレクター 瀧宮 和男 (たきみや かずお)

上級研究員(研究当時) 尾坂 格 (おさか いたる)

テクニカルスタッフ(研究当時) 鈴木 康仁 (すずき やすひと)

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻

講師 横田 知之 (よこた ともゆき)

学術支援専門職員 小泉 真里 (こいずみ まり)

1. 背景

近年、環境からエネルギーを取得するエネルギーハーベスト技術^[4]とセンサーを組み合わせることで、センサーをスマート化する開発が盛んに行われています。特にウェアラブルなセンサーはスマート化することで、生体情報の継続的なモニタリングが可能となります。例えば、血圧・体温を継続的に測定することが可能になると、脳梗塞や風邪といった疾患の早期発見につながると考えられています。

このような生体継続モニタリングに向けたウェアラブルセンサーの開発では、環境エネルギー電源として衣服に貼り付け可能な電源が重要です。これは、衣服上へ電源を貼り付けることで十分な面積を確保でき、大きな電力を環境から取り出すことができるためです。このようなエネルギーハーベスト技術の中でも、ミリワット(mW)オーダーの高い電力を供給でき、かつ柔軟性にも優れた性能を持つ有機太陽電池は、ウェアラブルセンサー用電源の有力な候補として注目を集めています。

しかし、十分なエネルギー変換効率(太陽光エネルギーを電力に変換する効率)、伸縮性に加え耐水性という三つの重要な要素の同時達成は難しいため、これまで衣服貼り付け可能かつ洗濯可能な有機太陽電池は実現していませんでした。特に、非常に薄いフィルムを利用した場合には、フィルム表面の平坦性の確保が難しいことや、ガスバリア性(気体を透過させにくい性質)が著しく低下することから、高い性能や長期間の安定動作を実現させることが難しく、ウェアラブルセンサー用電源を実現する際の制約となっていました。

2. 研究手法と成果

共同研究チームは、2012年に理研創発分子機能研究グループが開発した新しい半導体ポリマーである「PNTz4T^[5]」^{注1)}を用い、逆型構造^[6]の有機太陽電池を厚さ約1マイクロメートル(1 μ m、1,000分の1mm)の高分子材料であるパリレン^[7]基板上へ作製することで、超薄型有機太陽電池を作製しました。この有機太陽電池は、高いエネルギー変換効率・伸縮性・耐水性を同時に実現し、衣服貼り付け可能かつ洗濯可能な環境エネルギー電源です(図1)。



図1 衣服上に貼り付けた超薄型有機太陽電池の洗濯写真

厚さ3 μ mの超薄型有機太陽電池素子を貼り付けた白いワイシャツ(綿100%)を洗剤水に漬けて洗っている様子。

作製した超薄型有機太陽電池は、ガラス支持基板から剥離した状態で高いエネルギー変換効率を示しました(図2)。具体的には、擬似太陽光(出力100 mW/cm²)照射時における短絡電流密度(J_{sc})が16.2 mA/cm²、解放電圧(V_{oc})0.71 V、フィルファクター^[8]69%であり、エネルギー変換効率7.9%を達成しました。これまでに報告された柔軟性の高い有機太陽電池の効率が4.2%であることと比較すると、2倍近い効率の改善です。さらに、このデバイスは約50%までつぶしても安定的に駆動し、非常に高い機械的柔軟性を持つことも確認できました。

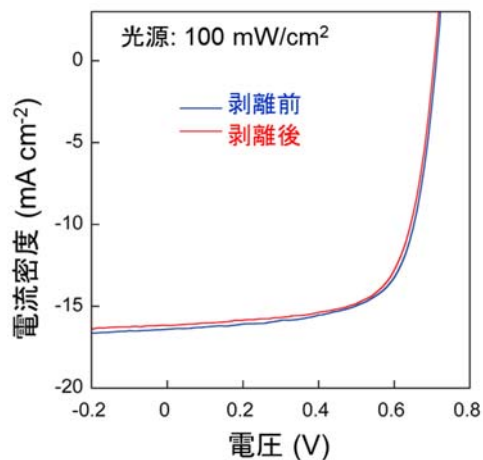


図2 超薄型有機太陽電池の電流・電圧特性

支持ガラスから剥離前（青）と剥離後（赤）の比較。剥離前後で電流・電圧特性の低下はなく、超薄型自立膜の状態で 7.9%という高いエネルギー変換効率を達成した。

また、作製した超薄型有機太陽電池は非常に高い耐水性を持つことが分かりました。5 分間水中に浸した後であっても、ほとんどエネルギー変換効率の低下はみられませんでした。さらに、黒水性ペンでデバイス表面に染みを付けた際にも、デバイスを洗剤液中にて浸漬・攪拌することによってデバイス表面の汚れを取り除き、素子性能の低下を引き起こすことなくエネルギー変換効率を初期値に戻すことができました（図3）。

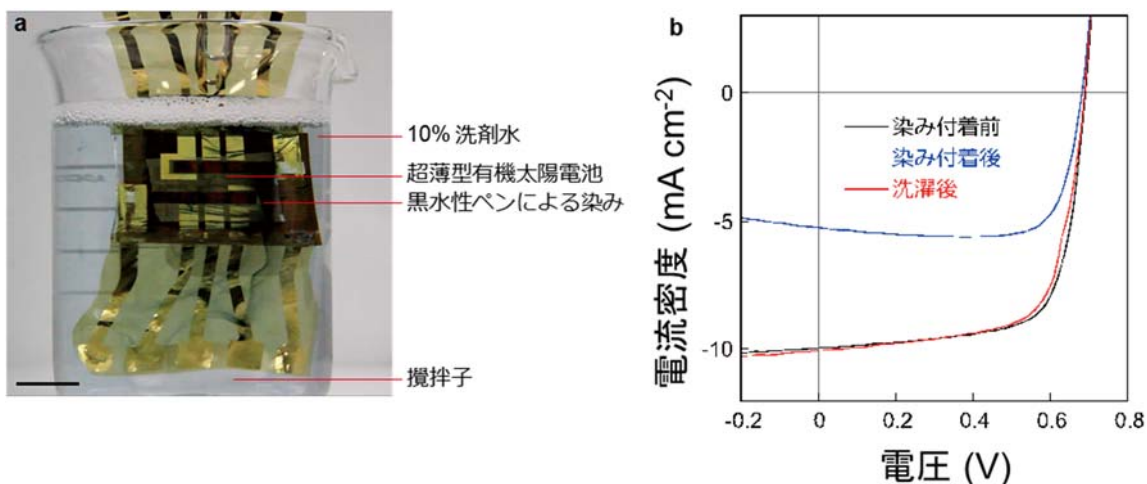


図3 超薄型有機太陽電池の洗濯試験

- a) 10%の中性洗剤を入れた水の中に、超薄型有機太陽電池を入れて5分間攪拌した。
- b) 黒水性ペンで超薄型有機太陽電池表面に染みを付けると、電流が大きく減少した（黒から青）。しかし、aの方法により洗濯することで、素子性能を全く低下させることなく、染みをつける前の状態まで回復させることができた（赤）。

さらに、あらかじめ引張させた2枚のゴムによって、厚さ $3\mu\text{m}$ の超薄型有機太陽電池を双方向から挟むことで、伸縮性を保ちつつ、耐水性を劇的に向上する

封止を実現しました（図 4）。ゴム封止がないデバイスでは、120 分間の水中浸漬によりエネルギー変換効率が初期値から 20%程度低下したのに対し、ゴム封止を行ったサンドイッチ構造のデバイスでは 5%の低下に抑えることができました（図 5）。また、ゴム封止を行ったデバイスは非常に高い伸縮性を持ち、水滴をデバイス上へ滴下・一定時間保持しつつ約 50%の伸縮を繰り返し行った際にも、エネルギー変換効率は初期値の 80%を保ちました。

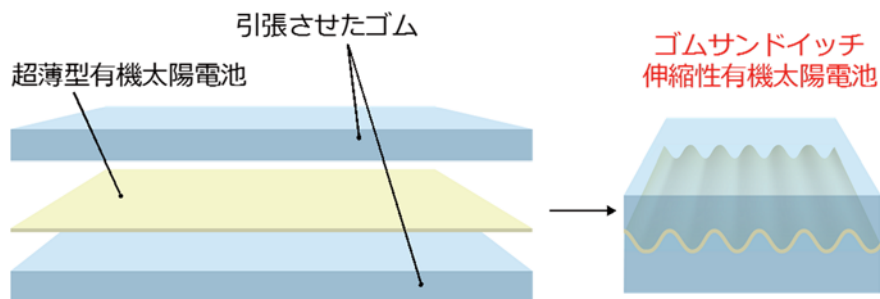


図 4 ゴムサンドイッチ構造による高い耐水性を持つ伸縮性有機太陽電池

総膜厚 3 μ m の超薄型有機太陽電池フィルムをあらかじめ引張させた 2 枚のゴムでサンドイッチすることにより、伸縮性と驚異的な耐水性を両立した有機太陽電池が実現した。

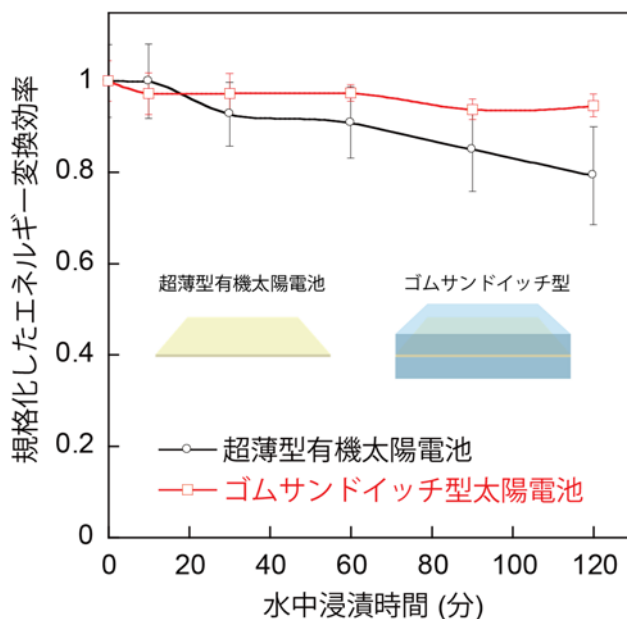


図 5 水中への浸漬時間によるエネルギー変換効率の変化

総膜厚 3 μ m の自立膜の状態（黒線）では、120 分間の水中浸漬で初期のエネルギー変換効率と比較して 20%程度低下した。一方で、ゴムサンドイッチ構造を用いると、120 分間の水中浸漬をした後も 5%の低下に抑えられた。

注 1) 2015 年 5 月 26 日プレスリリース「塗って作れる太陽電池で変換効率 10%を達成」
http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150526_1/

3. 今後の期待

本研究では、逆型構造の太陽電池と高い安定性・エネルギー変換効率を持つ半導体ポリマーを組み合わせることで、洗濯可能な超薄型有機太陽電池を実現しました。さらに、双方向からゴムによって太陽電池を封止することで、伸縮性を保ちつつ耐水性を改善しました。

衣服貼り付け可能な環境エネルギー電源として本研究で実現した洗濯可能・伸縮性の超薄型有機太陽電池は、ウェアラブルデバイスや e-テキスタイルに向けた長期安定電源応用の未来に大きく貢献すると期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Stretchable and waterproof elastomer-coated organic photovoltaics for washable electronic textile applications

<著者名>

Hiroaki Jinno, Kenjiro Fukuda, Xiaomin Xu, Sungjun Park, Yasuhito Suzuki, Mari Koizumi, Tomoyuki Yokota, Itaru Osaka, Kazuo Takimiya, and Takao Someya

<雑誌>

Nature Energy

<DOI>

10.1038/s41560-017-0001-3

5. 補足説明

[1] 有機太陽電池

有機半導体を光電変換層として用いた太陽電池のこと。塗布プロセスによる大量生産が適用できると同時に、安価かつ軽量で柔らかいことから次世代の太陽電池として注目を集めている。

[2] 半導体ポリマー

半導体の性質を持つポリマー（高分子の有機化合物）材料。可視光を吸収することができ、有機溶剤に溶けるため、塗ることができる半導体として、有機薄膜太陽電池をはじめとした有機デバイスに応用されている。

[3] e-テキスタイル

センサーやマイクロチップなど、電子機器を衣料や布地（テキスタイル）に埋め込み、情報収集や遠隔管理など、一般の繊維素材では得られない新しい機能を備えたテキスタイル素材のこと。より広義の同様の語句として「スマートテキスタイル」がある。

[4] エナジーハーベスト

光、振動、熱などの環境中に存在し、使われずに捨てられているわずかなエネルギーを採取して、電力を得る技術を意味する。電池の購入や交換不要な無線センサー技術を実現するための、電力供給技術として注目されている。

[5] PNTz4T

理研の研究チームが 2012 年に開発した半導体ポリマーの名称。PNTz4T を塗布して作製した有機薄膜太陽電池の光交換効率は 10%程度と、有機薄膜太陽電池としては世界最高レベルである。

[6] 逆型構造

通常の有機太陽電池は透明導電極、正孔輸送層、有機半導体による光電変換層、電子輸送層、裏面電極という構造をとるのに対し、逆型構造では正孔輸送層と電子輸送層の配置が逆である。通常の構造では、裏面電極としてアルミニウムやカルシウムなどの腐食性・反応性の高い材料を使う必要があるのに対し、逆型構造では裏面電極に非腐食性金属である銀や金を使用できるため、対環境安定性に優れた素子構造である。

[7] パリレン

高分子材料の一種。化学気層堆積法によって良質の均一薄膜が形成できる。生体適合性に優れているため、さまざまな生体・医療用途に応用されている。

[8] フィルファクター

太陽電池素子の最適動作点での出力（最大出力）を、開放電圧と短絡電流の積で割った値のこと。曲線因子とも呼ぶ。一般的にフィルファクターが高い（100%に近い）素子のほうがよい性能であると考えられる。太陽電池内部の直列・並列接続の抵抗値やダイオード損失の影響を受けて、フィルファクターの値は小さくなっていく。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい

理化学研究所

創発物性科学研究センター 創発ソフトシステム研究チーム

研究員 福田 憲二郎（ふくだ けんじろう）

（染谷薄膜素子研究室研究員、JST さきがけ研究者）

チームリーダー 染谷 隆夫（そめや たかお）

（染谷薄膜素子研究室主任研究員、東京大学大学院工学系研究科教授）



福田 憲二郎



染谷 隆夫

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

東京大学大学院工学系研究科 広報室

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

<JST事業に関すること>

中村 幹 (なかむら つよし)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町