

4. 発電と農業を両立する波長選択型有機太陽電池の開発

大阪大学産業科学研究所 教授 家 裕隆

概要

本研究では、農業用ハウスにエネルギー創出機能を付与することを目的として、青色および赤色光を農業（光合成）に利用し、光合成への寄与が小さい緑色光および近赤外光を発電に活用する波長選択型有機太陽電池（OPV）の開発を行った。波長選択型 OPV は農業用ハウスへ直接設置可能であり、農作物の生育を阻害することなく、広大な農地を活用した発電が可能である点を特徴とする。本研究では、緑色光および近赤外光に選択的に応答する新規有機半導体材料の開発を進めた。さらに、緑色光波長選択型材料については、メートルスケールのモジュール作製を検討するとともに、その透過光環境下における農作物の生育評価を実施した。モジュール作製には高額な試作コストを要するため、三菱財団による助成は本研究の推進において極めて有効であった。

背景および目的

本研究は、農業用ハウスにエネルギー創出機能を付与することを目的として、青色および赤色光を農業（光合成）に利用し、光合成への寄与が小さい緑色光および近赤外光を発電に活用する波長選択型の有機太陽電池（OPV）の創出を目指すものである。波長選択型 OPV は農業用ハウスへ直接設置可能であり、農作物の生育を阻害することなく、農地を活用した発電を実現できる点に特徴がある。

従来の太陽電池においては、シリコン太陽電池は高い発電効率を有するものの、重量や柔軟性の欠如、および可視光を広範に遮断する特性から農業用ハウスへの適用が困難である。また、ペロブスカイト太陽電池は軽量・高効率である一方、鉛や錫といった有害元素の使用に起因する環境負荷が懸念される。これに対して OPV は軽量かつ柔軟であり、農業用ハウスへの直接設置が可能であるが、従来の OPV は波長選択性を有さないため、農作物の生育に必要な光を遮断し、収穫量低下を招くという課題がある。

このような背景のもと、本研究では農作物の生育に必要な光を透過しつつ、それ以外の波長帯域のみを選択的に発電に利用する波長選択型 OPV の実現を目指す（図 1）。具体的には、ドナーおよびアクセプターからなる有機半導体材料の設計により、緑色光および近赤外光に選択的に応答する新規材料を開発する。緑色光選択型 OPV においては、低コストかつ高い供給安定性を有するドナーと新規アクセプターとの組み合わせにより、透過した青色および赤色光を農作物の生育に利用しながら発電を可能とする。また、近赤外光選択型材料の開発により、農業用ハウス内の温度上昇の原因となる近赤外光由来の熱を抑制しつつ、太陽光エネルギーの有効利用を図る。

本研究で提案する波長選択型 OPV は、「温室効果ガス削減」と「食料供給の安定確保」という我が国の重要課題を同時に解決し得る革新的技術である。さらに、社会実装に向けては、発電効率の向上と農作物生育に適した吸収波長帯域を制御可能な材料設計が不可欠であることから、本研究では有機合成を基盤とした分子設計により、波長選択性と高性能を両立する有機半導体材料の創出を目的とする。

波長選択型OPV

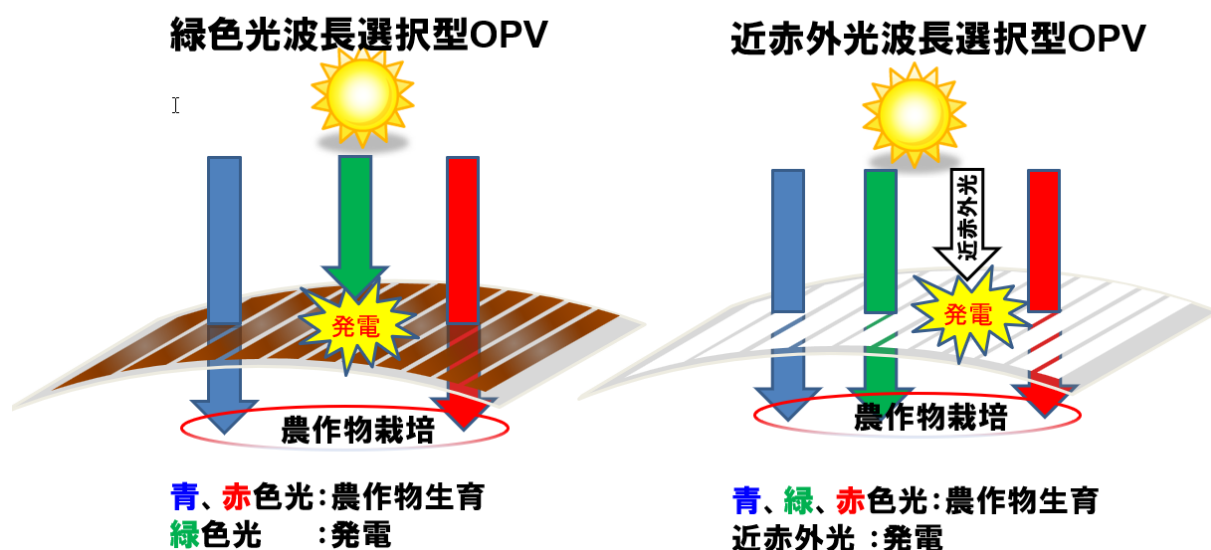


図 1. 波長選択型 OPV の模式図

方法

OPV は、正孔輸送性を有するドナーと電子輸送性を有するアクセプターを混合したバルクヘテロ構造膜を活性層として用いる。これらの有機半導体材料は、分子構造の修飾により最高占有軌道（HOMO）および最低空軌道（LUMO）のエネルギーレベル、ならびに HOMO-LUMO ギャップ（ E_g ）を精密に制御できる点に特徴がある。従来の高効率 OPV では、可視光全域の光を吸収するため、異なる E_g を有するドナーおよびアクセプターを組み合わせる設計指針が一般的である（図 2）。しかしながら、このような広帯域吸収を前提とした設計では、波長選択性を有する OPV の実現は困難である。そこで本研究では、従来とは対照的に「狭い波長領域の光吸収」を設計指針とし、同程度の E_g を有するドナーとアクセプターを組み合わせることで、特定波長に選択的に応答する OPV の構築を試みた。具体的には、450～600 nm の緑色光領域に選択的な光吸収・発電特性を有するアクセプター（FNTz-F-CN）の設計・合成を行った。ドナーとしては、低コストかつ供給安定性に優れるポリ（3-ヘキシルチオフェン）（P3HT）を用いた。P3HT は 500～600 nm 付近に吸収を有し、光合成に重要なクロロフィルの吸収帯と相補的な関係にあるため、農業用ハウスへの応用に適した材料である。以上の設計に基づき、波長選択性を有する OPV 活性層の構築とデバイス作製を行い、その発電特性を評価した。

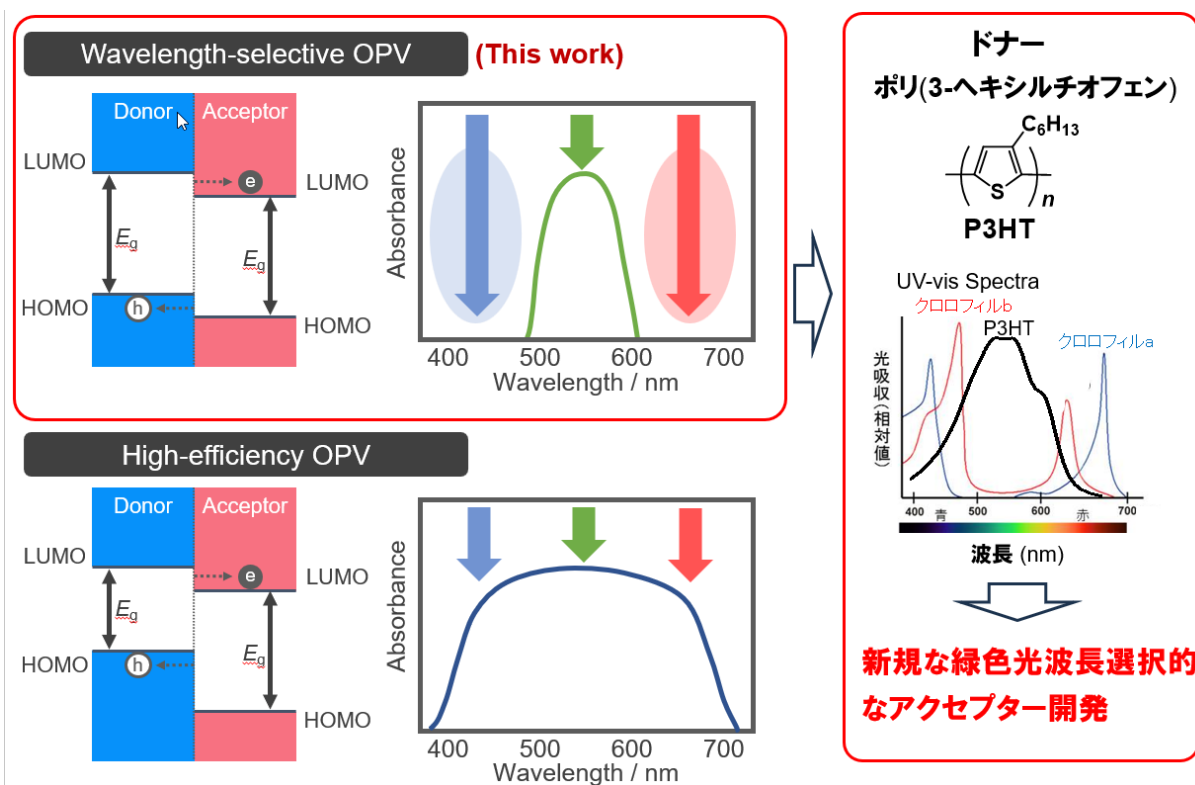


図 2. 緑色光波長波長選択型 OPV の開発指針

近赤外波長選択型 OPV の開発に向けては、近赤外吸収を実現するには E_g の縮小が必要であり、ドナーとアクセプターの分子構造設計が鍵となる。しかしながら、近赤外吸収を有する有機半導体の分子設計は未成熟である。このため、長波長領域では熱緩和や三重項を介した失活が優勢となり、OPV 応用の進展を妨げている。また、ドナーとアクセプターの最適組み合わせを探索することは容易ではない。そこで本研究では、挑戦的なアプローチとして単一成分子有機半導体材料に着目した。近赤外吸収を実現する設計指針としては、 E_g を低減するための分子構造修飾、特に電子供与性ユニットと電子受容性ユニットを組み合わせさせた D-A 共役系の構築を行った。

太陽電池の開発

緑色光波長選択性を有する非フラーレン型アクセプターは、光合成色素であるクロロフィルと相補的な光吸収特性を示す。研究着手時点において、FNTz 部位を有し高い化学的安定性を特徴とする新規アクセプター FNTz-FA を既に見出していた。P3HT と組み合わせたセルサイズ 9 mm^2 のデバイスにおいて、可視光領域における発電効率 (Vis-PCE) 9.3% を達成した。この結果は、本材料系が農業応用に適した光学特性を有することを示唆するものである (図 3)。

そこで本研究では、FNTz 骨格を基盤とし、有機半導体材料のスペーサー部位および末端部位の構造修飾を行うことで、第二世代アクセプター FNTz-F-CN を開発した。本材料を P3HT と組み合わせ、素子構造を最適化した結果、Vis-PCE 17% の高い発電性能を達成した。これは、波長選択性と高効率を両立した有機太陽電池として極めて有望な結果である。

さらに、モジュール作製に関する検討も行った。まず、FNTz-FA を用いた OPV についてモジュール化を検討し、目標サイズである 100 cm^2 のモジュール作製に成功するとともに、太陽電池としての動作を実証した。この知見を基に、FNTz-F-CN を用いてフレキシブル基板上でロール・ツー・ロール (RtoR) プロセスによるメートルスケールの OPV を作製した。その結果、発電層の均一な成膜が可能であり、安定したデバイス動作を確認した。

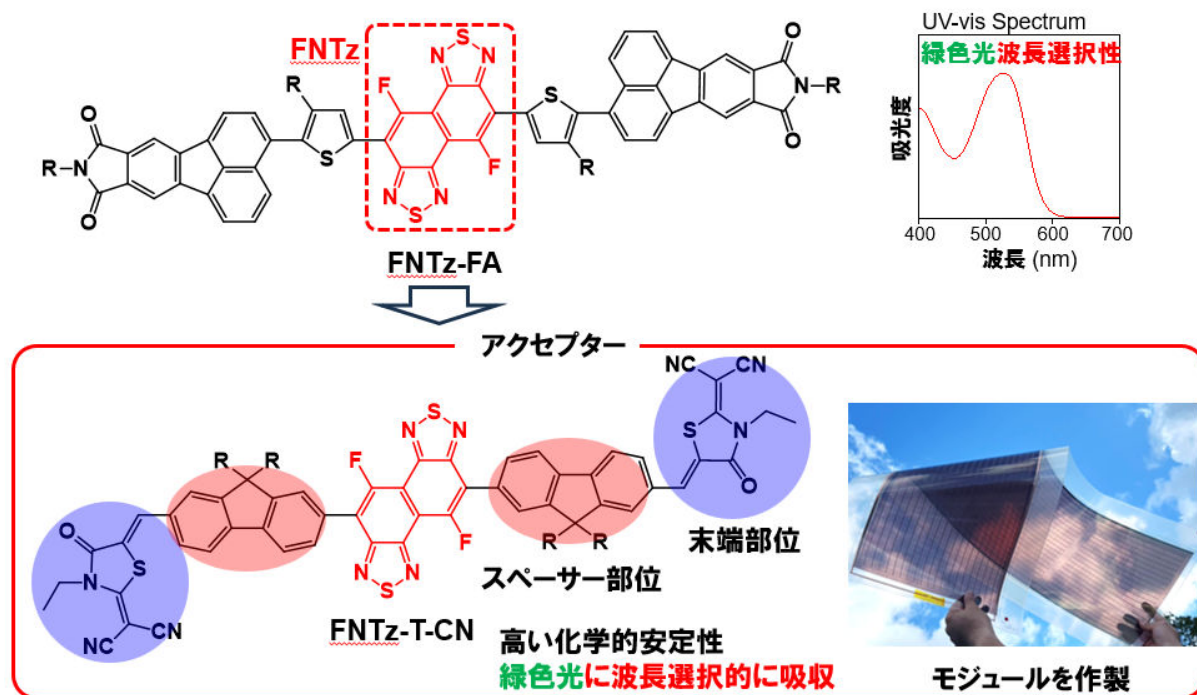


図 3. 緑色光波長選択的アクセプターの開発

近赤外波長選択型 OPV に向けて、近赤外光を選択的に吸収・発電可能な分子の開発を目的として、強力なドナー性を有する PID ユニットを新たに設計し、アクセプター性末端ユニットと連結した PID-E-fDCI を開発した。本分子は、薄膜において 800～1200 nm の近赤外領域に選択的な吸収を示し、可視光領域ではほとんど吸収を持たないため、無色透明な薄膜を形成する。さらに、PID-E-fDCI を発電層に用いた単一成分型 OPV を作製したところ、ほぼ無色透明な素子が得られ、1.5%の NIR-PCE を示した。

農作物生育評価

本研究では、緑色光波長選択型 OPV が農作物生育に与える影響を評価するため、温室環境における栽培実証を行った。具体的には上述のメートルスケールの P3HT:FNTz-F-CN モジュールを温室内に設置し、トマト苗の栽培を行った。その結果、収量および糖度はいずれも対照区と同等であり、作物生育への悪影響がないことが確認された(図 4a,b)。花卉栽培への適用性を検討するため、ヒマワリおよびトルコギキョウを対象とした評価を行った。緑色光波長選択型 OPV 下では照度は低下するものの、生育指標（草丈、茎径、花径等）や開花品質に顕著な差は認められず、トルコギキョウでは高温障害であるチップバーンの発生が約 10%低減する効果も確認された。

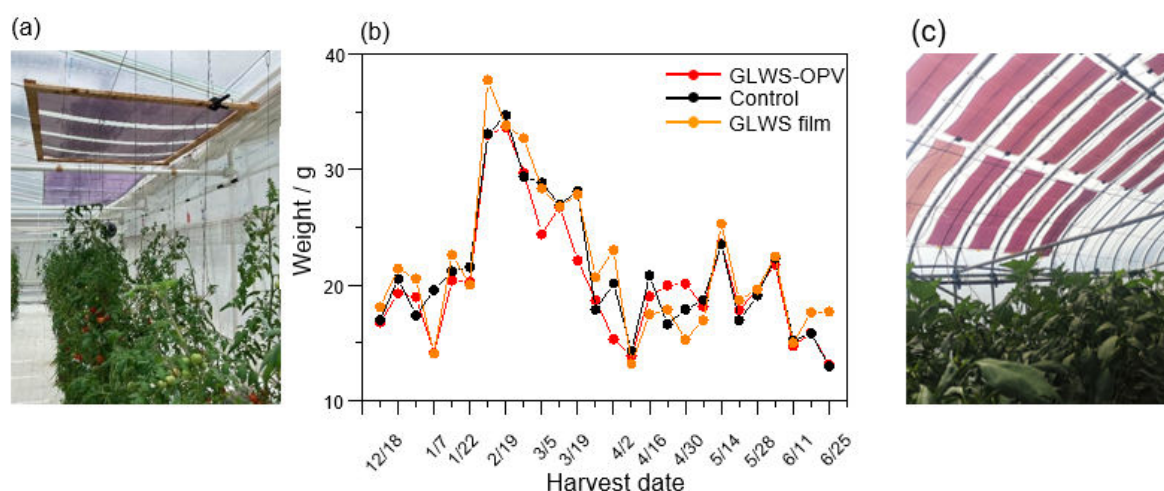


図 4. 緑色光波長選択型 OPV 透過下での農作物評価

さらに、実環境に近い条件として、温室屋根に緑色光波長選択型 OPV 下を部分的に設置し、ホウレンソウの栽培試験を実施した (図 4c)。その結果、葉形や生育に有意な差は認められず、収穫重量も対照区と同等であった。これらの結果より、緑色光波長選択型 OPV は農作物の生育を阻害することなく発電機能を付与できる技術であり、特に高温期の環境制御を含めた農業利用において有望であることが示された。

(完)

発表論文

- 1) S. Chatterjee, N. Tagashira, N. Shimohara, Y. Watanabe, Y. Ie
Controlling Green-Solvent Processability via the Dipole Moment of Nonfullerene Acceptor in Green-Light Wavelength-Selective Organic Solar Cells Agrivoltaics
ChemSusChem 19 (2026) e202501902.
- 2) S. Jinnai, Y. Shiono, K. Wang, Y. Iimuro, Y. Watanabe, S.-i. Kato, Y. Ie
Benzothiadiazole-Based Fused-Ring Electron Acceptors for Green-Light Wavelength-Selective Organic Solar Cells
J. Photopolym. Sci. Technol. 38 (2025) 285.
- 3) S. Chatterjee, N. Shimohara, T. Seo, S. Jinnai, T. Moriyama, M. Saida, K. Omote, K. Hara, Y. Iimuro, Y. Watanabe, Y. Ie
Green-Light Wavelength-Selective Organic Solar Cells: Module Fabrication and Crop Evaluation towards Agrivoltaics
Mater. Today Energy. 45 (2024) 101673.
- 4) S. Jinnai, N. Shimohara, K. Ishikawa, K. Hama, Y. Iimuro, T. Washio, Y. Watanabe, Y. Ie
Green-Light Wavelength-Selective Organic Solar Cells for Agrivoltaics: Dependence of Wavelength on Photosynthetic Rate
Faraday Discuss. 250 (2024) 220.
- 5) Colorless Near-Infrared Absorbing Dyes Based on B-N Fused Donor-Acceptor-Donor pi-Conjugated Molecules for Organic Phototransistors
S. Yokoyama, S. Utsunomiya, T. Seo, A. Saeki, Y. Ie
Adv. Sci. 11 (2024) 2405656.

引用文献

- 1) Green-Light Wavelength-Selective Organic Solar Cells Based on Poly(3-hexylthiophene) and Naphthobisthiadiazole-Containing Acceptors toward Agrivoltaics
S. Jinnai, A. Oi, T. Seo, T. Moriyama, M. Terashima, M. Suzuki, K.-i. Nakayama, Y. Watanabe, Y. Ie
ACS Sustain. Chem. Eng. 11 (2023) 1548-1556.