

農業生産と両立可能な光透過型有機太陽電池

Semitransparent Organic Photovoltaics for agriculture and solar power generation

渡邊康之*

1. はじめに

農地の上で太陽光発電を行い、農業生産と太陽光発電を同時に行うコンセプトは、国内ではソーラーシェアリング（営農型太陽光発電）⁽¹⁾と呼ばれているのに対して、国外では Agrivoltaic ⁽²⁾ と呼ばれている技術である。

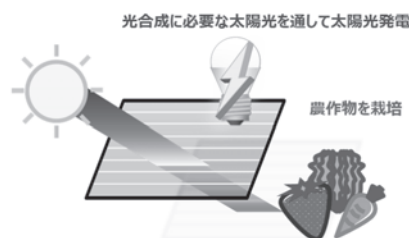
ソーラーシェアリングのための農地転用許可件数は2018年8月末までで1347件となり、2014年と比較して4年間で6.2倍に増加した。こうした許可事例の増加と作付作物の多様化が進む一方で、作付け作物を許可市町村数順にみると、ミョウガ（65カ所）、サカキ（41カ所）、米（35カ所）、しいたけ（31カ所）となっている。遮光率が高くて（日陰でも）生育可能な品種が選ばれる傾向があり、遮光率100%の事例さえ見られる。このように、営農に対する取り組みが不十分な事例が目立つこと、優良事例の周知が不十分なことで農業委員会ベースではソーラーシェアリングに対するマイナスイメージが先行しているといった課題も明らかになってきている⁽³⁾。これらの課題は、従来の光を通さない太陽光パネルを用いたソーラーシェアリングでは、作物がパネルの影に隠れてしまい収穫量の減少や品質が低下することに起因している。

これらの課題を解決すべく、我々は有機薄膜太陽電池（OPV）のフレキシブル、軽量、光透過性という従来の太陽光パネルにはない特徴を活かすことに加え、光の波長選択性に着目し、作物栽培に必要な光を通す太陽電池を独自に開発することで作物と太陽光発電で光の色を分け合う『ソーラーマッチング』技術に関する研究を遂行してきた^{(4) - (7)}。

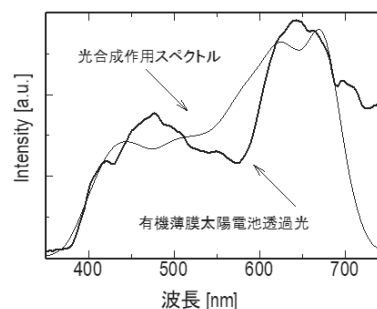
本技術では太陽電池の変換効率が5%程度でも、農地全面に設置可能であり既存のソーラーシェアリングと同等以上の電力が得られるため、高い変換効

率のパネルの技術進歩を待つ必要がない、新たな着想である。さらに、電気のない山間部だけではなく、エネルギー多消費型農業であるハウス栽培の補助的なエネルギー源となる優位性があり、スマート農業技術を加速する革新性がある。

特に最近では、有機薄膜太陽電池の性能が躍進してきており、タンデム型で効率17.3%が報告されている⁽⁸⁾。この値は一般的な多結晶Si型太陽電池の変換効率の値を上回るものであり、次世代太陽電池の有力候補に再び名乗りを上げる勢いがある。さらに変換効率25%以上も十分達成可能で、他の太陽電池技術と比べても高い競争力を持つ可能性がある



(a) 有機薄膜太陽電池の透過光を用いた植物栽培



(b) 光合成作用スペクトルと太陽電池の透過光スペクトル

図1 農作物栽培と太陽光発電を両立するソーラーマッチング技術

* 公立諏訪東京理科大学 工学部 機械電気工学科

と言われており、農業応用に関しても現実味を帯びてきた。本稿では、OPVを用いたビニールハウスでの栽培実証実験、農業用光透過型OPVの試作と栽培検証、OPVの変換効率及び耐久性向上への検討について報告する。

2. ソーラーマッチングの定義

図1に『ソーラーマッチング』の概念図を示す。図1(a)では、太陽光を有機薄膜太陽電池による発電とその透過光を用いて植物栽培を行うの概念図を表している。図1(b)に、光合成作用スペクトルと有機薄膜太陽電池の太陽光の透過光スペクトルを示す。光合成作用スペクトルとは植物の光合成に必要な光スペクトルを調査したものである。これらの図から、農作物栽培に必要な光である青色域と赤色域の光を透過し、農作物栽培に寄与しない緑色域の光で発電可能なシースルー有機薄膜太陽電池を開発することで農作物栽培と太陽光発電の両立を勘案した『ソーラーマッチング』が可能であり、下記実績に示すように農業現場で実証した例は世界でも報告例はない、極めて独自性の高い成果を得ている。さらに、波長変換材料を用いた光合成促進シートの併用等による、高品質・増産を指向した技術開発にも新たにチャレンジする。

3. 実験結果

3.1 OPVを用いたビニールハウスでの栽培実証実験

まず、実際の農地を模したビニールハウスでの栽



図2 ビニールハウスでの実験の様子

培結果を述べる。図2に示すように栽培面積約11 m²のハウスを2棟用意し、片方にOPVを設置した。設置場所は長野県、土壌は黒ボク土である。図3に土壌診断結果を示す。図4にOPV (Power Plastic 40, Konarka) の透過スペクトルを示す。可視光のうち500–600 nmの波長を強く吸収するスペクトル形状が得られた。光合成作用曲線に類似しているため、植物育成に有利であると考えられる。

表1に葉物野菜(ほうれん草)、根菜(ジャガイモ)、穀物(そば)での栽培結果をまとめた。光飽和領域に達していないと考えられる穀物を除き、OPV透過光下での栽培のほうが高い収穫量を示した。以上の結果から、作物によってはソーラーマッチングが可能であると言える。

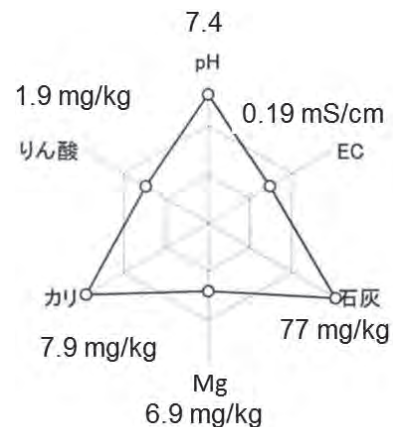


図3 ビニールハウス内の土壌診断結果

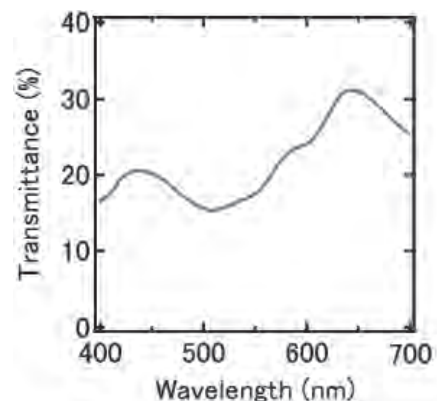


図4 OPVの透過光スペクトル

表1 OPVの有無による収穫量の比較

	With OPV	Without OPV
ほうれん草収穫量(g)	749	642
ジャガイモ収穫量(g)	5460	4570
そば収穫量(g)	47	140

3.2 農業用光透過型 OPV の試作と栽培検証

図5に今回作製したシースルーモジュールの断面構造を示す。セル構成は逆構造とした。バリア膜付きPETフィルム上にITOをパターンニングし、電子輸送層としてZnOナノ粒子をスピコートした。次に、発電層と正孔捕集層として高導電性のPEDOT:PSSを塗布し、楕形のAg電極（ライン/スペース=200 μm /800 μm ）を真空蒸着した。その後、パッシベーション膜としてパリレンを熱CVDにより製膜し、ハイミランを用いた熱ラミネート法により、キャップフィルム（バリア膜付きPETフィルム）を貼り合せた。

図6に作製した小型シースルーモジュールの写真を示す。サイズは93 mm $\times$ 95 mmで5直列である。発電層をP3HT:PC61BMとしたモジュールの太陽電池特性評価を擬似太陽光（100 mW/cm²）照射下で行ったところ、電流値5.3 mA、電圧2.4 Vが得られた。

ここでは、光合成速度の飽和を利用した植物栽培法について検証する。小型の水耕栽培器(UHA01E1, ユーイング)にチマサンチュの苗を定植、株の半分にはOPV透過光を照射し、もう半分にはLED光源をそのまま照射した。液肥は大塚ハウス1号を200 g/L、大塚ハウス2号を400 g/L、大塚ハウス5

号を2.5 g/L混ぜたものを使用した。このとき、pHは5.8、ECは1486であった。

図7にチマサンチュの光合成速度と照射光強度の関係を、植物光合成総合解析システム(LI-6400XT, メイワフォーシス)により測定した結果を示す。PPFD = 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ のときが晴天時におけるおおよその太陽光強度である。500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ の時点ではほぼ光合成速度は飽和していることが分かる。これは光飽和領域と呼ばれており、入射光は500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 以上必要無いことが分かる。一方、500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 以下は光律速領域と呼ばれ、光強度に比例して光合成速度が直線的に増加する。使用したLED光源の光強度は261 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ であり、明らかに光律速領域である。

図8にシースルー太陽電池の透過光スペクトル、図9に植物栽培試験の写真を示す。作物はサンチュとして小型ケース内で、液肥による栽培を行った。この小型ケースの上面に今回作製したシースルー型OPVを貼り付け（図9写真右側）、OPVモジュールによる遮光がサンチュ栽培に与える影響について実証実験を行った。使用したLED光源の光強度（光合成光量子束密度）は261 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 、これを一日16時間照射した。ここで、使用したOPVモジュールの透過光スペクトルを図8に示す。波長600-700 nmの光をより透過するスペクトルが得られた。

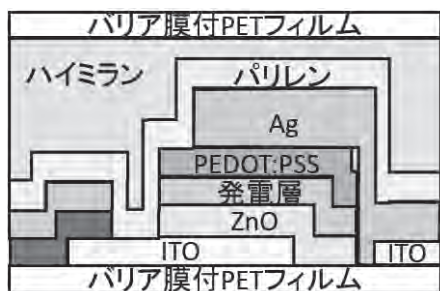


図5 シースルーモジュールの断面構造



図6 今回作製した小型シースルーモジュール

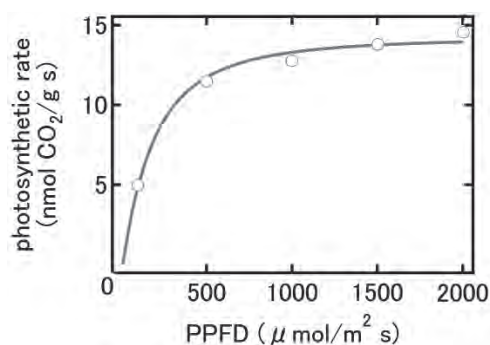


図7 光強度に対する光合成速度

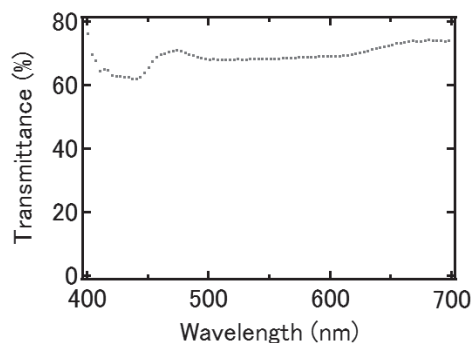


図8 シースルー太陽電池の透過光スペクトル

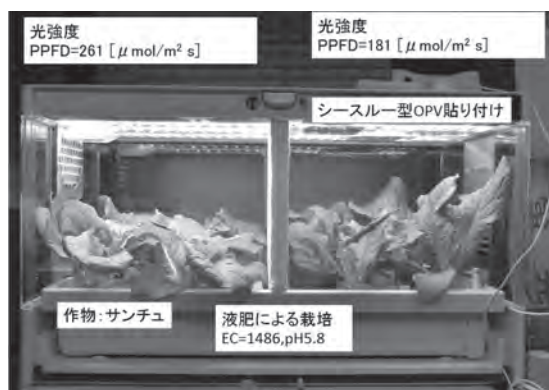


図9 シースルー太陽電池による植物栽培の試み

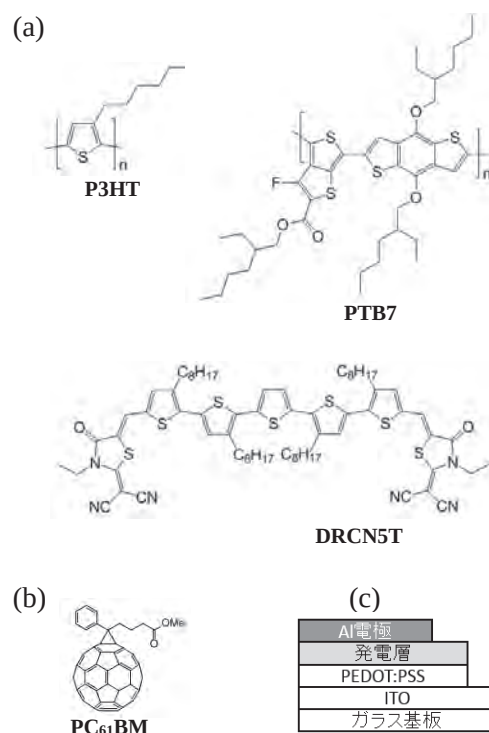
表2 収穫量の光量依存性

	太陽電池あり	太陽電池なし
光強度 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)	181	261
収穫量 (g)	12	15

表2に、得られた作物の乾燥重量と光強度の関係を示す。光強度31%減少に比べて、乾燥重量の減少は17%にとどまった。これは、OPVが植物栽培に必要なエネルギーのみ選択的に透過していることを示唆している。植物成長は個体差が大きいため追試が必要であるものの、OPV透過光による植物栽培“ソーラーマッチング”は研究室レベルでは可能であると言えよう。

3.3 OPVの変換効率及び耐久性向上への検討

本耐熱試験で用いたp型半導体の分子構造を図10(a)に示す。ポリチオフェン誘導体Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)(P3HT)は、OPVでは最もポピュラーな高分子p型材料であり、n型半導体であるフラーレンC60誘導体[6,6]phenyl C61butyric acid methyl ester(PC61BM, 図10(b))との混合膜を発電層とした素子で、初期効率3-4%が報告されている⁽⁹⁾。Poly(4,8-bis[(2-ethylhexyloxy)benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene-2,6-diyl]-3-fluoro-2-[(2-ethylhexyl)carbonyl]thieno[3,4-b]thiophenediyl)(PTB7)は、P3HTと比べて長波長域の光を吸収しHOMOの深い高分子p型材料であり、最適化した素子で初期効率7-9%が報告されている⁽¹⁰⁾。添加剤として1,8-ジヨードオクタン(DIO)を加えることで、混合膜中でp型とn型のナノ相分離構造が形成され、励起子発生・電荷分離・電荷輸送が効率良く行われるが、DIOは室温で液体の為、熱安定性の問題が指摘されている。ドナー(D)性のオリゴチオフェン5量体の両末端に、アクセプター(A)性の2-(1,1-dicyanomethylene)rhodanine骨格を付加したDRCN5Tは、最近開発

図10 (a) p型半導体 (P3HT, PTB7, DRCN5T) (b) n型半導体 (PC₆₁BM) (c) 素子構造

されたA-D-A型の低分子p型材料であり、C₇₀誘導体PC₇₁BMとの混合膜で、添加剤なしでも最高で初期効率10%を超える値が報告されており⁽¹¹⁾、高効率かつ高耐久な材料として期待されている。

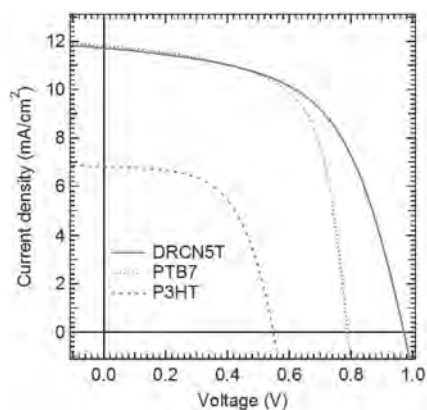
本試験での素子構造を図10(c)に示すが、いわゆる順構造と呼ばれるものであり、積層も単純な構造を用いた。ITO付きガラス基板を酸素プラズマ処理し、PEDOT:PSS(Clevios P AI 4083)をスピンコートした。その後グローブボックス内で、p型半導体(P3HT, PTB7 or DRCN5T)とn型半導体(PC₆₁BM)を溶媒に溶かした混合溶液を作成し、基板上にスピンコートし発電層を作成した。材料の混合比(wt%)はP3HT:PC₆₁BM=3:2(溶媒:クロロベンゼン)、PTB7:PC₆₁BM=2:3(溶媒:クロロベンゼン)、DRCN5T:PC₆₁BM=5:4(溶媒:クロロホルム)である。PTB7:PC₆₁BMの溶液にはDIOを3 vol%添加した。

製膜後、P3HT:PC₆₁BM薄膜はホットプレートで110℃、10 min、DRCN5T:PC₆₁BM薄膜は120℃、10 min加熱し、最後にアルミ電極を150 nm蒸着し素子を作製した。封止はグローブボックス内でディスプレイスパンサーを用いてUV硬化樹脂を塗布し、カバーガラスを被せてUV照射後、80℃、1時間ポストバークすることにより行った。太陽電池の電流-電圧測定は、擬似太陽光(100 mW/cm²)を素子に照射し

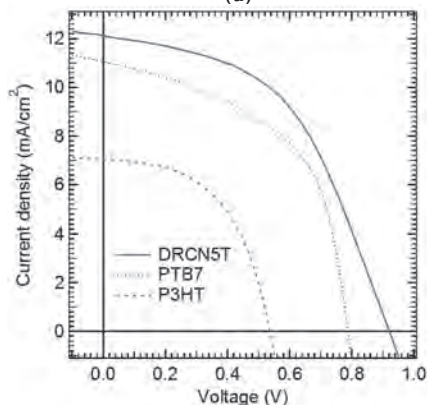
て行った（受光面積（マスク有）：0.28 cm²）。なお、封止前のセルは窒素雰囲気下のカプセルに入れて測定し、封止後は大気中にて測定を行った。耐熱試験は、封止したセルをグローブボックス中で、85℃のホットプレート上に61時間静置し、加熱後のセルを大気中にて測定を行った。

表3に封止前、封止後、封止後85℃で61時間加熱した各種セルの太陽電池特性データを示す。まず封止前後での特性変化を比較する。これは、主に封止後のポストバーク（80℃、1時間加熱）の影響と考えられる。P3HTは封止による影響は無く効率は2.18%のままであった。これに対し、PTB7は J_{sc} が減少したが V_{oc} が増加し、その結果効率は若干向上し5.98%となった。 J_{sc} の減少は、加熱により発電層の相分離構造が変化し、電荷発生および輸送効率が低下した為と考えられ、 V_{oc} の増加は、発電層/アルミ電極間の接触が熱処理により向上した為と考えられる。またDRCN5Tは J_{sc} が増加した為、効率が若干向上し6.43%となった。 J_{sc} の増加は、加熱によりドメイン内の結晶性が向上し、発電層中の電荷輸送特性が改善した為と考えられる。

封止後85℃で61時間加熱したP3HT、PTB7、DRCN5Tのセルでは、効率がそれぞれ1.98%、4.63%、5.51%となり、加熱前のセルと比べていずれも低下した（表3、図11（a）、（b）参照）。ただし各パラメータを見ると、 FF はいずれのセルでも減少したのに対し、 J_{sc} はPTB7では減少し、P3HTとDRCN5Tでは増加した。 FF の低下は、これまでP3HTの順構造セルでの報告にもある通り⁽¹²⁾、PEDOT:PSSに含まれる酸が加熱によりアルミ電極まで拡散し、発電層/アルミ界面に絶縁体であるアルミナが形成



(a)



(b)

図11 封止後85℃で61時間加熱したセルの J - V 特性

された為と考えられる。したがって、低仕事関数の電極を用いない逆構造を適用すれば、本問題は解決可能と思われる。PTB7の J_{sc} 低下については、PTB7セルは室温で液体の添加剤DIOを含むため、加熱により相分離構造およびドメインサイズが変化しやすいことが原因と考えられる。これに対し、P3HTとDRCN5Tセルは添加剤を含まないため薄膜中で分子が動きにくく、加熱による相分離構造の大きな変化はないが、ドメイン内の結晶性は向上するため電流が流れやすくなるものと考えられる。

4. おわりに

OPVを用いたビニールハウスでの栽培実証実験においては、葉物野菜、根菜、穀物等の栽培結果から光飽和領域に達していないと考えられる穀物を除き、OPV透過光下での栽培のほうが高い収穫量を示し、ソーラーマッチングが可能であることを示した。また、農業用光透過型OPVの試作と栽培検証では、植物成長は個体差が大きいため追試が必要であるものの、OPV透過光による植物栽培“ソーラーマッチング”は研究室レベルでは可能であることを示した。さらに、OPVの変換効率及び耐久性向上

表3 各種セルの太陽電池特性データ

P 型	条件	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	PCE (%)
P3HT	封止前	6.83	0.55	0.58	2.18
	封止後	6.83	0.55	0.58	2.18
	封止後 85℃61h 加熱	7.05	0.54	0.52	1.98
PTB7	封止前	12.26	0.73	0.64	5.68
	封止後	11.83	0.79	0.64	5.98
	封止後 85℃61h 加熱	11.07	0.79	0.53	4.63
DRCN5T	封止前	11.22	0.97	0.58	6.31
	封止後	11.72	0.97	0.57	6.43
	封止後 85℃61h 加熱	12.13	0.92	0.49	5.51

への検討では、各種 p 型材料を用いた OPV セルの耐熱試験とシースルー小型 OPV モジュールの作製および農業利用の取り組みについて紹介した。p 型材料は、添加剤を含まずに効率の高い材料の開発が必要で、DRCN5T は効率と耐久性を両立する材料として有望であることが明らかになった。今後、逆構造の適用や耐湿・耐光試験等を実施して、実用化に資する耐久性があるかを見極める必要がある。シースルーモジュールの農業利用については、まずは各農作物についての遮光性と植物栽培に与える影響の基礎データを収集し、今後の発電材料の選択にフィードバックを掛けていくことが必要である。

謝辞

本研究は、諏訪東京理科大学「特色ある教育研究費」(2010 年)の助成を受け、農業用太陽電池を作製し、植物栽培の実証実験を行った成果を足がかりとして、東京理科大学「重点課題特別研究推進費」(2014-2016)の助成の支援を受けた成果である。また、DRCN5T は、産業技術総合研究所電子光技術研究部門の橋浩昭博士が合成し提供して頂きました。本研究の一部は(株)MORESCO および日本航空電子工業(株)との共同研究の成果である。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 長島彬, 日本を変える, 世界を変える!「ソーラーシェアリングのすすめ」, リックテレコム (2015/10/15)
- 2) GOETZBERGER, A.; ZASTROW, A. (1982-01-01). "On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation". *International Journal of Solar Energy*. 1 (1) : 55-69.
- 3) 千葉大学倉阪研究室・NPO 法人地域持続研究所, 「ソーラーシェアリング全国調査結果報告書」, 2019 年 2 月.
- 4) 渡邊康之, “太陽光を発電と農業に! 究極の太陽電池の利用法”, MATERIAL STAGE, Vol.13, No.8, 1-6 (2013).
- 5) 渡邊康之, “太陽光から電気, 食糧, 燃料を作る, シースルー有機薄膜太陽電池の開発”, 光合成研究と産業応用最前線 (26-1), エヌ・ティー・エス出版. (2014 年 12 月).
- 6) 伊藤勇輝, 瀧沢悠吾, 桑野航平, 飯野太智, 平田陽一, 渡邊康之, 谷内利明, 農業への適用を考慮した透過型有機薄膜太陽電池の出力特性及び透過光評価, 太陽エネルギー 44 (5) 49-56, 2018 年
- 7) 渡邊康之, 有機薄膜太陽電池を用いた発電するビニールハウス, 太陽エネルギー 45 (4) 16-22, 2019 年
- 8) Lingxian Meng, Yamin Zhang, Xiangjian Wan, Chenxi Li, Xin Zhang, Yanbo Wang, Xin Ke, Zuo Xiao, Liming Ding, Ruoxi Xia, Hin-Lap Yip, Yong Cao, Yongsheng Chen, Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency, *Science* 14 Sep 2018 : Vol. 361, Issue 6407, pp. 1094-1098
- 9) M.T. Dang, L. Hirsch, G. Wantz, P3HT : PCBM, Best Seller in Polymer Photovoltaic Research, *Adv. Mater.* 23, 3597 (2011)
- 10) Yongye Liang, Zheng Xu, Jiangbin Xia, Szu-Ting Tsai, Yue Wu, Gang Li, Claire Ray, Luping Yu, For the Bright Future-Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells with Power Conversion Efficiency of 7.4%, *Adv. Mater.* 22, E135 (2010).
- 11) Bin Kan, Miaomiao Li, Qian Zhang, Feng Liu, Xiangjian Wan, Yunchuang Wang, Wang Ni, Guankui Long, Xuan Yang, Huanran Feng, Yi Zuo, Mingtao Zhang, Fei Huang, Yong Cao, Thomas P. Russell, Yongsheng Chen, A Series of Simple Oligomer-like Small Molecules Based on Oligothiophenes for Solution-Processed Solar Cells with High Efficiency, *J. Am. Chem. Soc.* 137, 3886 (2015).
- 12) Toshihiro Yamanari, Tetsuya Taima, Jun Sakai, Jun Tsukamoto, and Yuji Yoshida, Effect of Buffer Layers on Stability of Polymer-Based Organic Solar Cells, *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 01AC02 (2010).

著者略歴



渡邊康之

2003 年 3 月東京理科大学工学研究科博士号取得, 東京理科大学工学部助手, 2003 年 10 月千葉大学ベンチャービジネスラボラトリー博士研究員, 2010 年 4 月諏訪東京理科大学工学部講師, 2017 年 4 月公立諏訪東京理科大学教授. 博士(工学). 有機半導体薄膜形成と評価及び光合成に関する研究に従事. 日本太陽エネルギー学会, 応用物理学会会員, 日本植物学会会員.