

公益財団法人 日本化学繊維研究所

第2回 新高分子材料研究会 報告書

『高分子とエネルギー・情報』をテーマとして専門家による講演および討論を下記のように実施した。産学の研究者・技術者・大学院生等から広く参加者を募り、オンラインで公開した。

総参加者数は125名であった（スタジオ会場の出席者14名を含む）。

日時： 2026年9月15日（火）13：30～15：30

形式： 無料公開型セミナー、ハイブリッド（京都技術科学センター会議室をスタジオ会場としてZOOM使用；一般参加者は原則オンライン参加）

講演題目： GXならびにIoTの発展に貢献するポリマー系次世代光電変換デバイス
— OPV & OPD —

講師： 尾坂 格氏（広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授）

コメンテーター：

若宮 淳志氏（京都大学化学研究所 教授，（株）エネコートテクノロジーズ
最高技術顧問）

村瀬 友英氏（三菱ケミカル（株）オープンイノベーション部 担当部長）

司会： 大北 英生氏（京都大学大学院工学研究科 教授）

以下には、講演の部および討論の部の各々について抄録を掲載します。

— 講演の部 —

GX ならびに IoT の発展に貢献する

ポリマー系次世代光電変換デバイス — OPV & OPD —

広島大学大学院先進理工系科学研究科

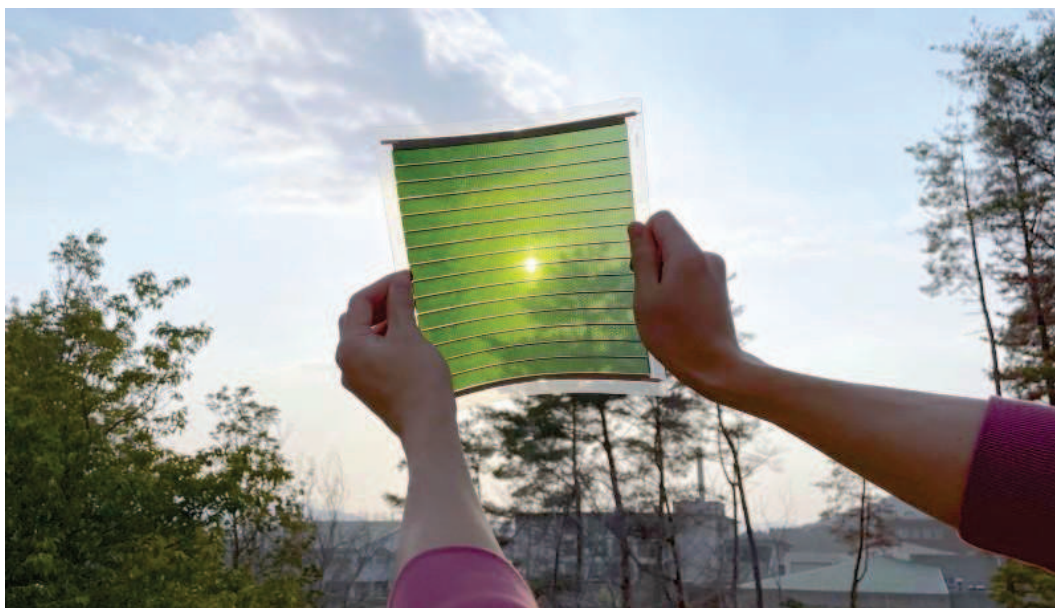
教授 尾坂 格

講演概要：

π 共役系ポリマーを光活性材料に用いた有機光電変換系は、塗布プロセスにより作製可能で、軽量・柔軟かつ大面積化に適した次世代型デバイスとして注目されている。再生可能エネルギーへの関心の高まりを背景に太陽光発電への応用が進む一方、近年では高度情報化社会の進展に伴い、次世代センシング技術としての展開も期待されている。

本講演では、有機薄膜太陽電池（OPV）（cf. 添付写真）および有機フォトディテクタ（OPD）の研究動向を概説し、光電変換特性の向上に資する材料設計およびデバイス設計に焦点を当てる。ポリマーのみならず低分子系を含む光活性材料の分子設計指針について、演者らの研究成果を交えて解説し、社会実装を見据えた今後の展望について議論する。

[KW: π 共役系ポリマー；有機薄膜太陽電池；有機フォトディテクタ]



軽量でフレキシブルな OPV モジュールの実例

発表内容 目次：

1. 有機光電変換系の現状
2. 光電変換メカニズムと材料に求められる機能
 - 2-1. OPV：太陽光をいかに電気エネルギーに変換するか
 - 2-2. OPD：微弱光をいかに検出するか
3. ドナー材料
 - 3-1. 結晶性向上
 - 3-2. 分子配向制御
4. アクセプター材料：フラレンと非フラレンの違い
5. OPV&OPD における再結合損失抑制
 - 5-1. 輻射・無輻射再結合電圧損失
 - 5-2. 再結合損失抑制に向けた分子設計
6. 長波長化に向けた材料設計
7. 社会実装に向けた取り組み

まとめ

講演スライド資料：

次々頁以降にスライド資料（掲載用抜粋・編集版）を収録しています。

（注）なお，本スライド資料の無断複製による転載は禁じます。

— 討論の部 —

出席者（パネラー）：

若宮淳志氏（京大化研；エネコート）・村瀬友英氏（三菱ケミカル）〔コメンテーター〕
尾坂 格氏（広大院先進理工）〔講演講師〕
大北英生氏（京大院工）〔司会〕

討論概要：

始めに、コメンテーターの若宮氏と村瀬氏より、尾坂氏の講演に対する総体的な所見とともに、関連事項に関する補足説明ならびにそれぞれの立場からの意見が述べられた。（若宮氏はペロブスカイト太陽電池をはじめ光電変換材料・デバイスの全般に係る先導的研究者であり、村瀬氏は OPD 関係の技術開発・産業応用に携わる企業研究者である。）

次いで司会の尾坂氏より、尾坂講演におけるキーワードを織り込んで設定した討論用サブテーマ 5 件（下記の①～⑤）が提示された。

- ① OPV/OPD の真の強み：シリコン・ペロブスカイト・OPV/OPD の適材適所
- ② IoT・屋内環境・GX における OPV/OPD のインパクト
- ③ OPV と OPD の分子設計における共通点と相違点：
外部量子効率や再結合電流の観点から
- ④ 社会実装に向けた最大の壁：スケールアップ・モジュール化・耐久性・コスト
- ⑤ 今いちばん注目・期待する“次世代光電変換材料・応用先”を一つ挙げるとしたら？

各サブテーマに関して、コメンテーター 2 氏からの問いや意見に対して講演者の尾坂氏が丁寧に回答するとともに、各々の視座からの主張や経験データを交換することで論議が深まり、熱の入ったパネルディスカッションが展開された。OPV/OPD とシリコン系・ペロブスカイト系との比較論を通して、“有機・高分子半導体からなる光電変換材料は、衣食住医の民生用途での利用展開は勿論のこと、IoT 対応の多種多様なセンサー開発にも貢献する”と、今般参加した視聴者の多くに期待を抱かせたと思われる。

「新高分子材料研究会」は、高分子材料がもつ社会的役割や意義、重要性を本財団が積極的に発信し、産学間学术交流の促進、ならびに高分子科学分野の振興に資することを目的とした公益事業です。

（公財）日本化学繊維研究所（〒606-8305 京都市左京区吉田河原町 14、京都技術科学センター内）

E-mail: institute.for.chemical.fibers@gmail.com

HP: <https://www.kasenken.jp/>

公益財団法人日本化学繊維研究所
第2回新高分子材料研究会「高分子とエネルギー・情報」
2026年9月15日（火）



**GXならびにIoTの発展に貢献する
ポリマー系次世代光電変換デバイスー OPV & OPD**

尾坂 格
広島大学大学院先進理工系科学研究科・教授

1

アウトライン

1. 有機光電変換系の現状
2. 光電変換メカニズムと材料に求められる機能
OPV：太陽光をいかに電気エネルギーに変換するか
OPD：微弱光をいかに検出するか
3. ドナー材料：結晶性向上、分子配向制御
4. アクセプター材料：フラレンと非フラレンの違い
5. OPV&OPDにおける再結合損失抑制
輻射・無輻射再結合電圧損失
再結合損失抑制に向けた分子設計
6. 長波長化に向けた材料設計
7. 社会実装に向けた取り組み

2

光の波長と光電変換素子



波長 (nm) → 400 800 1000 (1.0 μm) 1700 (1.7 μm)

可視 Vis 近赤外 NIR 短波赤外 SWIR

CMOSセンサー 生体イメージング 太陽電池 非破壊検査 LIDAR 光通信 生体深部イメージング

3

国内企業の実証実験、導入例



有機薄膜太陽電池外壁ユニットを導入したZEB実証棟
(三菱ケミカル・大成建設)

JR目白線でOPV実証実験
(イデアルスター社)

南三陸さんさん商店街へのOPV導入例
(MORESCO、イデアルスター、隈研吾設計事務所などの共同事業)

温湿度センサーや人感センサーなどのワイヤレス電源用途
(東洋紡：フランス政府機関CEAとの共同開発)

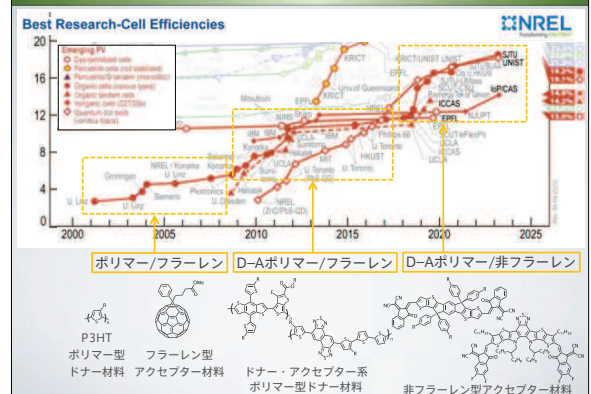
4

海外企業の実証実験，導入例



5

OPVの現状：材料の視点からみた効率向上



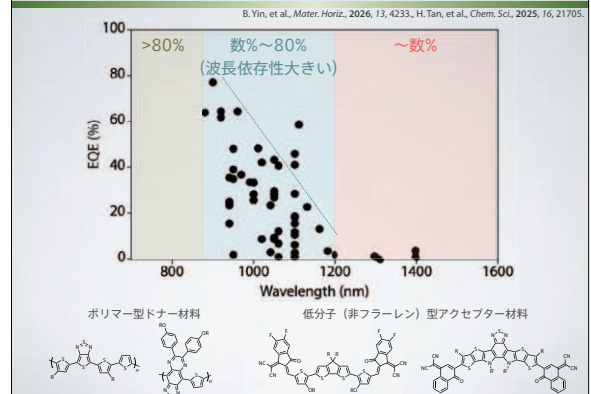
6

OPDの現状：国内企業



7

OPDの性能（外部量子収率/EQE）



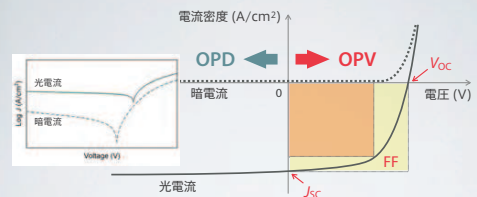
8

アウトライン

1. 有機光電変換系の現状
2. 光電変換メカニズムと材料に求められる機能
OPV: 太陽光をいかに電気エネルギーに変換するか
OPD: 微弱光をいかに検出するか
3. ドナー材料: 結晶性向上、分子配向制御
4. アクセプター材料: フラーレンと非フルラーレンの違い
5. OPV&OPDにおける再結合損失抑制
輻射・無輻射再結合電圧損失
再結合損失抑制に向けた分子設計
6. 長波長化に向けた材料設計
7. 社会実装に向けた取り組み

9

OPV & OPDの電流電圧特性と性能指標



OPD

比検出力 (D^*)

$$D^* (\text{Jones}) = \frac{R/\Delta f A}{I_{\text{noise}}}$$

R (A/W): 感度

$$R = I_{\text{ph}}/P_{\text{ph}} = \text{EQE}(q\lambda/hc)$$

I_{noise} (V): ノイズ電流 (暗電流 I_d に依存)

OPV

エネルギー変換効率 (PCE)

$$\text{PCE} (\%) = J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}$$

J_{sc} (mA/cm²): 短絡電流密度

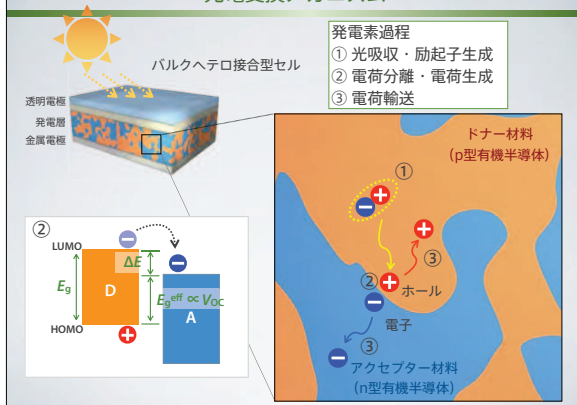
$$J_{\text{sc}} = q/\text{EQE}(\lambda)\Phi(\lambda)dA$$

V_{oc} (V): 開放電圧

FF: 曲線因子

10

光電変換メカニズム



11

材料に求められる機能

材料個別の機能・物性

- 光吸収 (吸収帯、吸光度)
- 発光 (励起子寿命、無輻射失活)
- エネルギー準位
- 溶解性
- 結晶性
- 分子配向

ドナー・アクセプター混合膜の機能・物性

- 光吸収帯/エネルギー準位のマッチング
- 相溶性/モルフォロジー/相分離構造
- 膜厚 (光吸収増大、暗電流抑制)

12

アウトライン

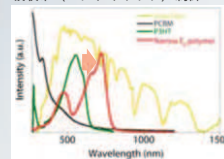
1. 有機光電変換系の現状
2. 光電変換メカニズムと材料に求められる機能
OPV: 太陽光をいかに電気エネルギーに変換するか
OPD: 微弱光をいかに検出するか
3. ドナー材料: 結晶性向上、分子配向制御
4. アクセプター材料: フラーレンと非フルラーレンの違い
5. OPV&OPDにおける再結合損失抑制
輻射・無輻射再結合電圧損失
再結合損失抑制に向けた分子設計
6. 長波長化に向けた材料設計
7. 社会実装に向けた取り組み

13

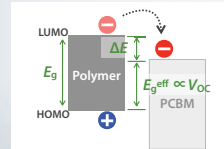
高効率化に向けた材料設計指針

■ 吸収帯と分子軌道の制御

吸収帯 (バンドギャップ) 制御

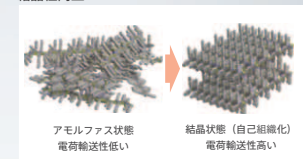


HOMO-LUMO制御

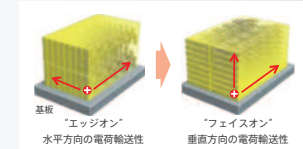


■ 集合体構造制御

結晶性向上



分子配向制御



14

ポリマーの結晶性向上

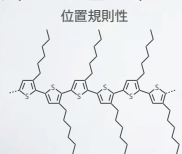
■ 主鎖構造 (ビルディングユニット)



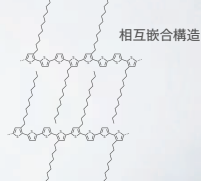
ドナー・アクセプター型 (D-A) 構造



■ 側鎖 (アルキル基など)

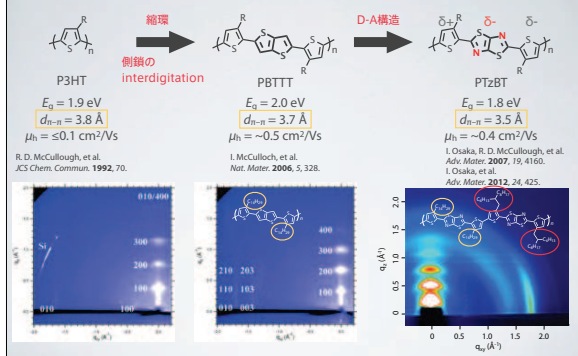


相互嵌合構造



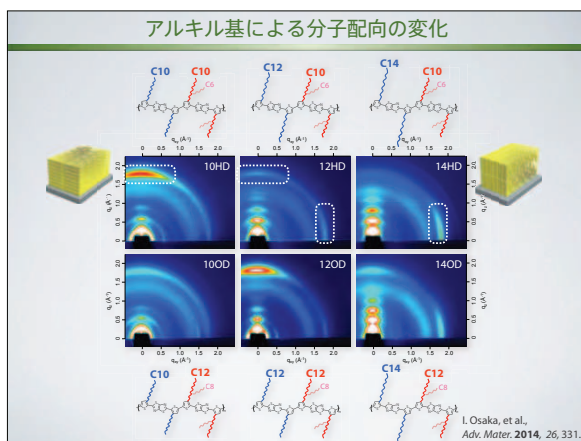
15

縮環×D-A

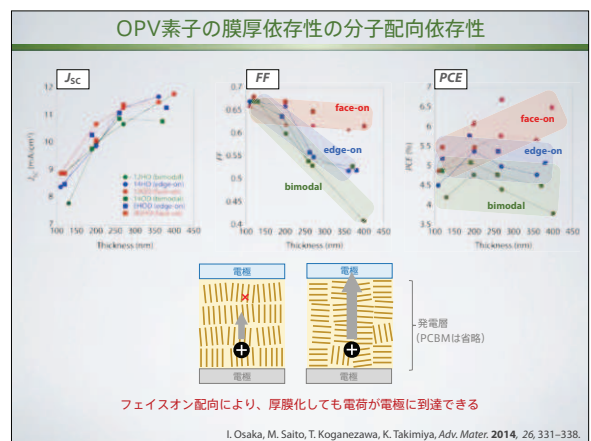


D-Aポリマーは嵩高い分岐状のアルキル基を置換していても、強くπスタックし、高い結晶性を示す

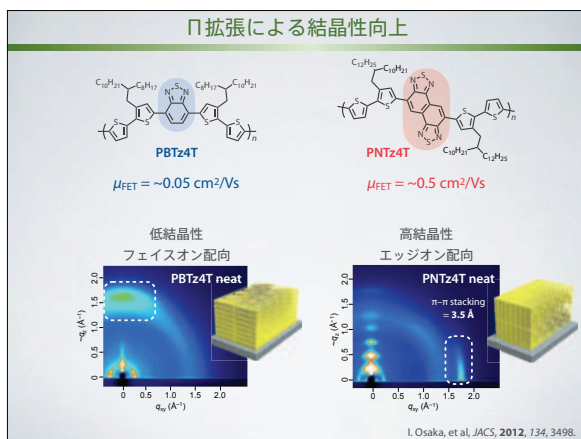
16



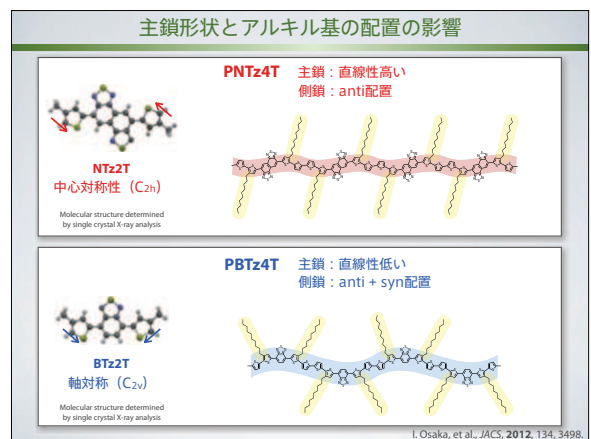
17



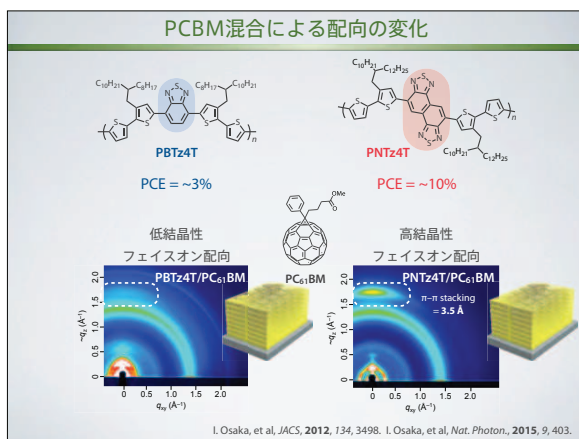
18



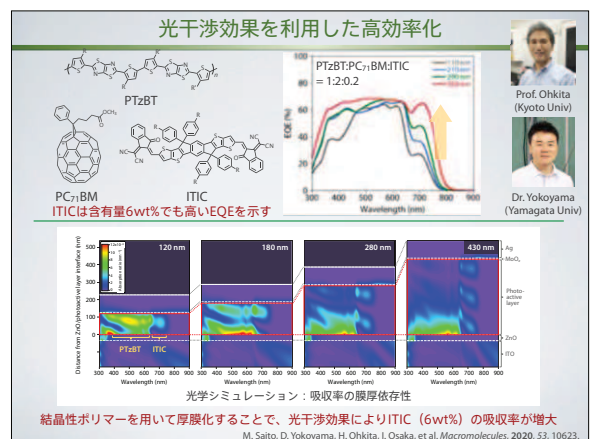
19



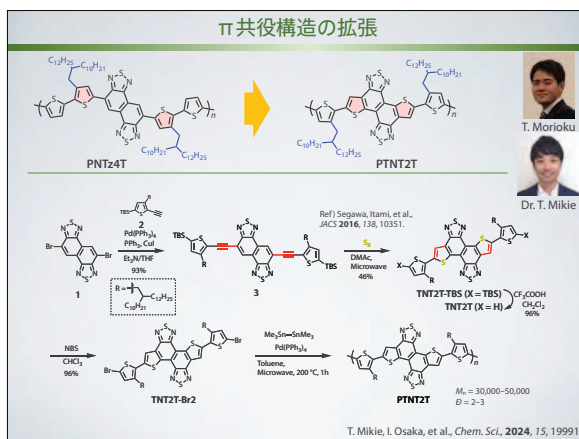
20



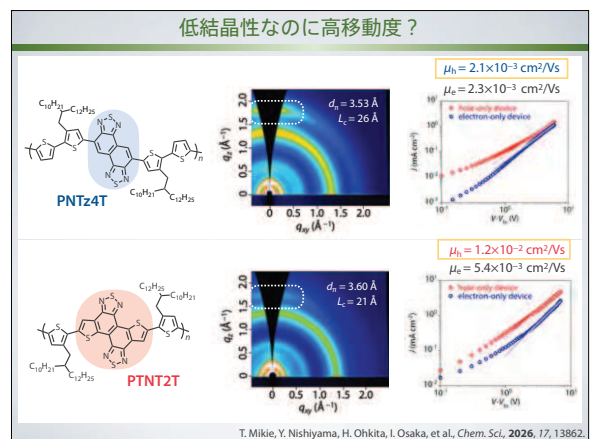
21



22

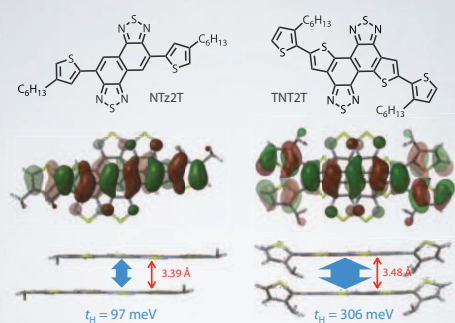


23



24

Core-to-coreスタッキングによる電荷輸送性向上



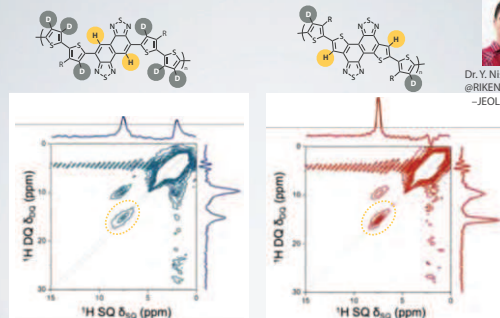
Transfer integral t_H calculated by the ADF program: Prof. Ie @Osaka Univ.

π 共役構造拡張により、core-to-coreでスタック

T. Mikie, Y. Nishiyama, H. Ohkita, I. Osaka, et al., Chem. Sci., 2026, 17, 13862.

25

ポリマー薄膜中での分子レベルスタッキング解析 (固体NMR)



d -polymer/ d -PCBM混合膜の2D 1H DQ-1H SQ NMR 相関スペクトル

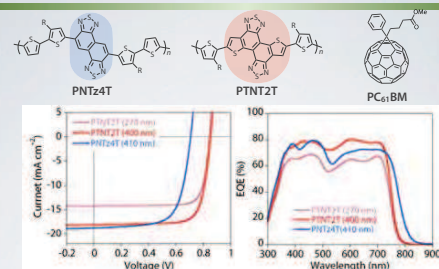
PTNT2TはPNTz4Tよりもプロトン相互作用が強く、分子レベルでのスタッキングがより顕著

T. Mikie, Y. Nishiyama, H. Ohkita, I. Osaka, et al., Chem. Sci., 2026, 17, 13862.

Dr. Y. Nishiyama
@RIKEN
-JEOL Resonance

26

低結晶性ポリマーでも高効率化可能



Polymer	Acceptor	Thickness (nm)	J_{SC} (mA cm ⁻²)	V_{OC} (V)	FF	PCE (%)
PNTz4T	PC ₆₁ BM	410	18.8	0.71	0.68	9.1
PTNT2T	PC ₆₁ BM	300	14.6	0.86	0.81	10.1
		450	19.0	0.86	0.74	12.0

厚膜でもFF > 0.8を実現、フラーレン型素子で世界最高の変換効率

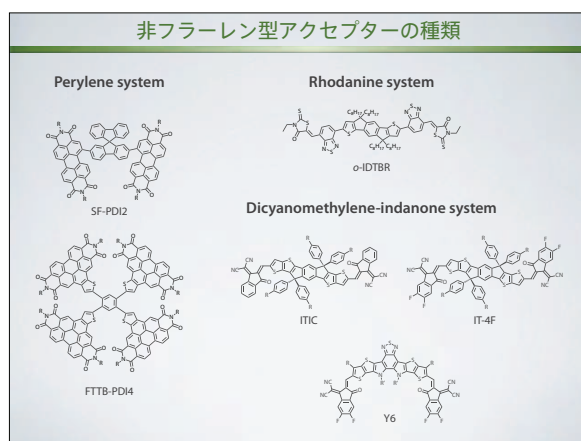
T. Mikie, Y. Nishiyama, H. Ohkita, I. Osaka, et al., Chem. Sci., 2026, 17, 13862.

27

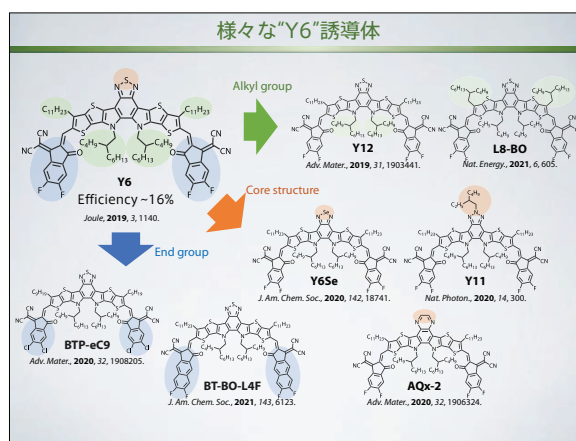
アウトライン

- 有機光電変換系の現状
- 光電変換メカニズムと材料に求められる機能
OPV: 太陽光をいかに電気エネルギーに変換するか
OPD: 微弱光をいかに検出するか
- ドナー材料: 結晶性向上、分子配向制御
- アクセプター材料: フラーレンと非フラーレンの違い
- OPV&OPDにおける再結合損失抑制
輻射・無輻射再結合電圧損失
再結合損失抑制に向けた分子設計
- 長波長化に向けた材料設計
- 社会実装に向けた取り組み

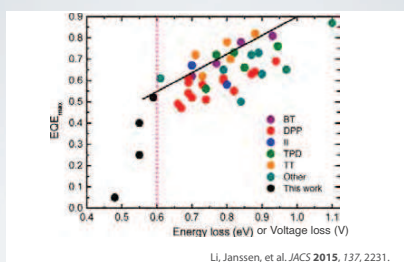
28



29

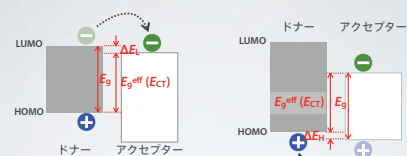


電荷生成と電圧損失 (J_{sc} と V_{oc}) のトレードオフ



33

OPVの本質的な課題

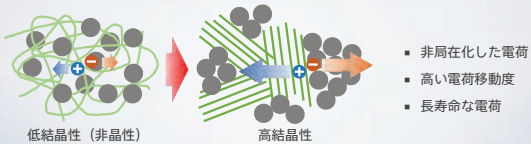
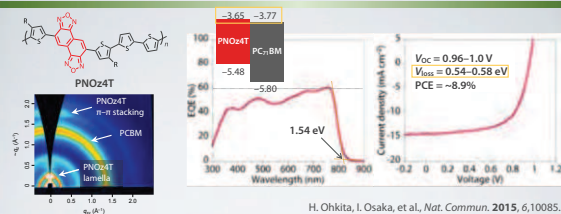


ΔE : ドナー/アクセプター間のLUMOまたはHOMOのエネルギー差 (オフセット)
 → 電荷分離のドライビングフォース
 → 電圧損失の要因

電圧損失低減には ΔE を最小化する必要があるが、それにより電荷分離の効率が低下する

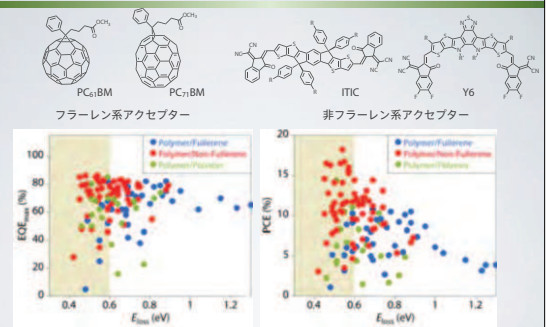
34

結晶性ポリマーによる小オフセット電荷生成



35

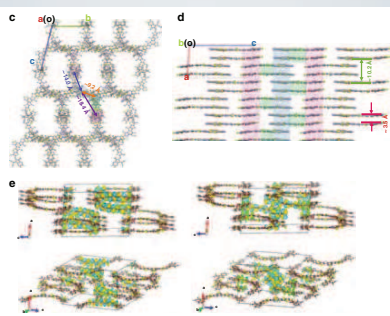
電荷生成 vs 電圧損失：フラーレンと非フラーレンの違い



非フラーレン系OPVは、フラーレン系OPVに比べて、電圧損失が抑制されても (ΔE が小さくても) 効率的に電荷分離する

36

非フラーレンが効率的に電荷を生成する要因

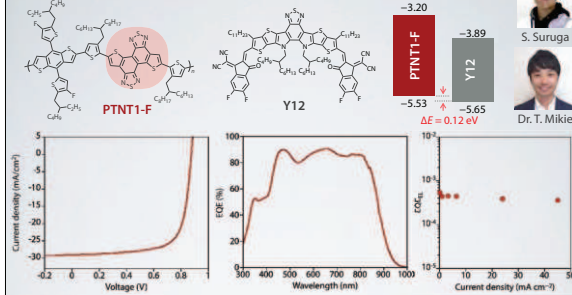


三次元的ネットワークを形成し、電荷が非局在化

X.-K. Chen, H.-L. Yip, J.-L. Bredas, *Nat. Commun.*, 2020, 11, 3943.

37

低電圧損失型ドナーポリマー



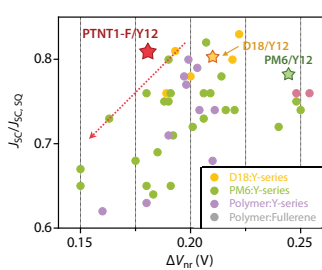
Blend	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (V)	FF	PCE (%)	ΔV_{nr} (V) ^a
PTNT1-F/Y12	28.3	0.874	0.737	18.3	0.18

^aVoltage loss due to the nonradiative recombination determined by $EQE_{IR} = -k_B T/q \ln(EQE_{IR})$

T. Mikie, K. Nakano, K. Tajima, H. Ohkita, I. Osaka, et al., *Commun. Mater.*, 2026, 7, 19.

38

無輻射再結合電圧損失と電荷生成効率の関係



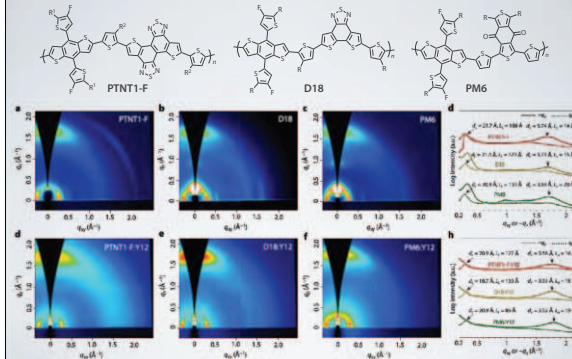
J_{sc} : Experimental J_{sc}
 $J_{sc,sq}$: SQ limit of J_{sc}
 ΔV_{nr} : Voltage loss due to the nonradiative recombination determined by $EQE_{IR} = -k_B T/q \ln(EQE_{IR})$

PTNT1-Fは同様に小さい ΔV_{nr} を有する系に比べて顕著に高い電荷生成効率を示す

T. Mikie, K. Nakano, K. Tajima, H. Ohkita, I. Osaka, et al., *Commun. Mater.*, 2026, 7, 19.

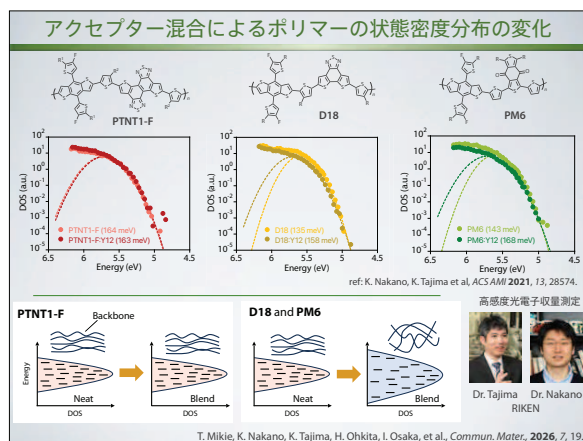
39

X線回折による結晶性

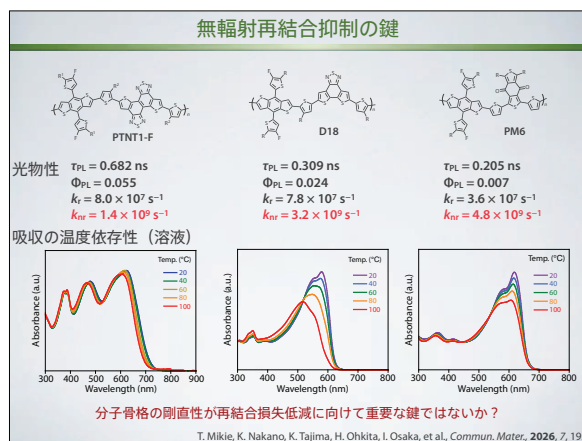


T. Mikie, K. Nakano, K. Tajima, H. Ohkita, I. Osaka, et al., *Commun. Mater.*, 2026, 7, 19.

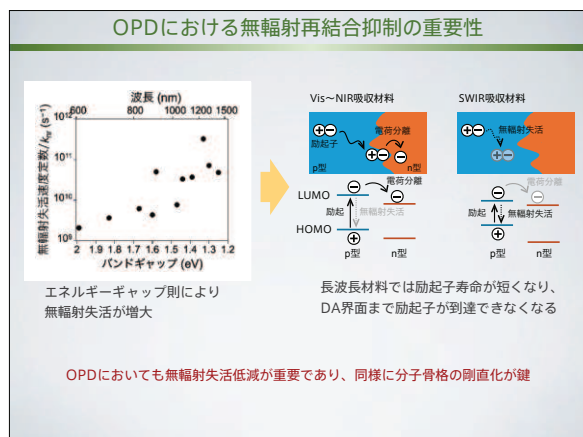
40



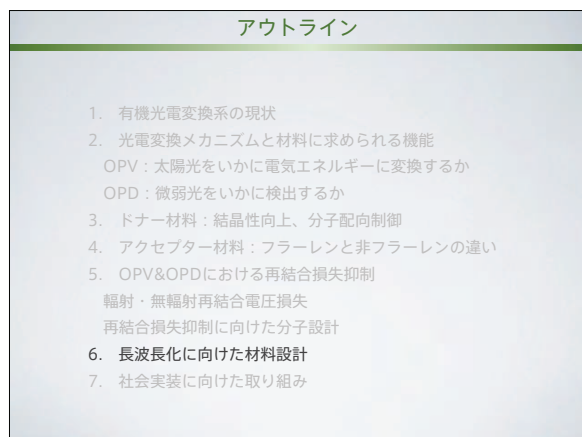
41



42

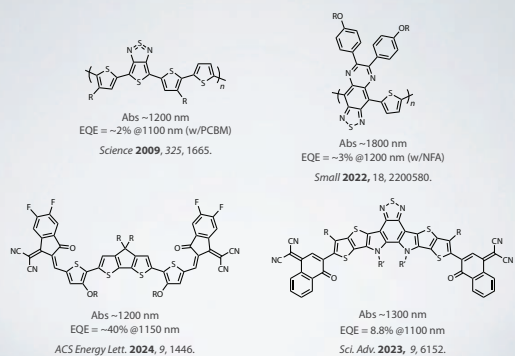


43



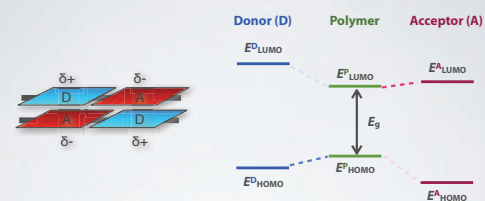
44

NIR~SWIR吸収型有機半導体



45

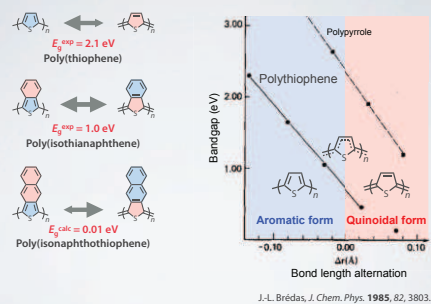
分子内ドナー・アクセプター構造による低バンドギャップ化



- ドナー性ユニットとアクセプター性ユニットの軌道の混成が生じる
- ドナー性ユニットのHOMOとアクセプター性ユニットのLUMOの影響が強い
- 単一ユニットからなるポリマーに比べて、バンドギャップは小さくなる

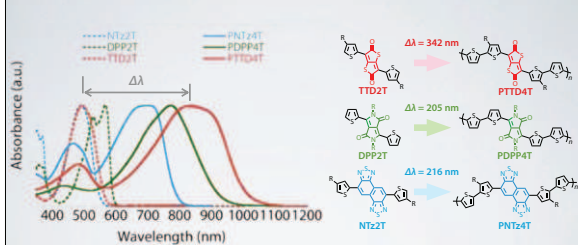
46

キノイド構造による低バンドギャップ化



47

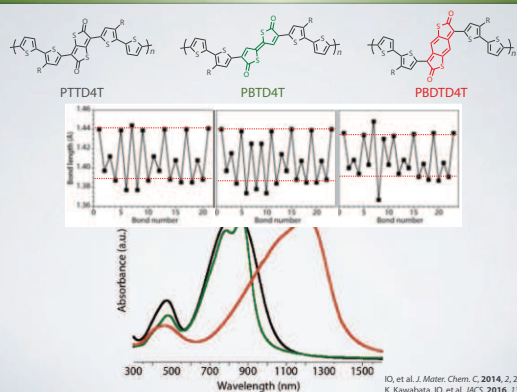
D-Aポリマーとキノイドポリマーの比較



I. Osaka, et al. *J. Mater. Chem. C*, **2014**, 2, 2307.

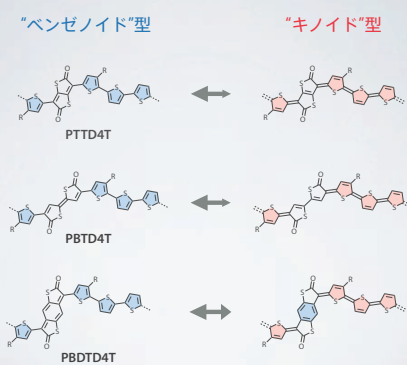
48

縮環キノイドを用いたポリマー



49

キノイド性の違い



K. Kawabata, I. Osaka, et al. *JACS*, 2016,

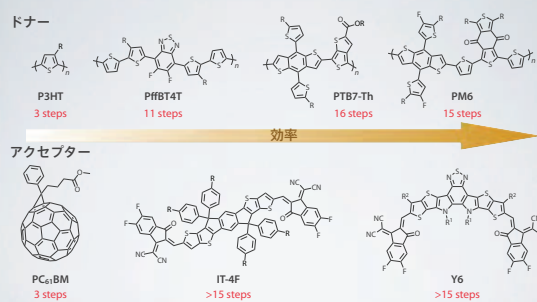
50

アウトライン

- 有機光電変換系の現状
- 光電変換メカニズムと材料に求められる機能
 - OPV: 太陽光をいかに電気エネルギーに変換するか
 - OPD: 微弱光をいかに検出するか
- ドナー材料: 結晶性向上、分子配向制御
- アクセプター材料: フラーレンと非フラーレンの違い
- OPV&OPDにおける再結合損失抑制
 - 輻射・無輻射再結合電圧損失
 - 再結合損失抑制に向けた分子設計
- 長波長化に向けた材料設計
- 社会実装に向けた取り組み

51

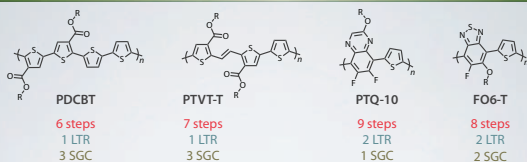
材料合成の複雑化



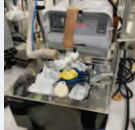
高効率化に伴い、材料の化学構造は複雑化し合成ステップ数も増加

52

シンプルな化学構造を有するドナー材料



低温反応 (LTR) : $\leq -30^\circ\text{C}$



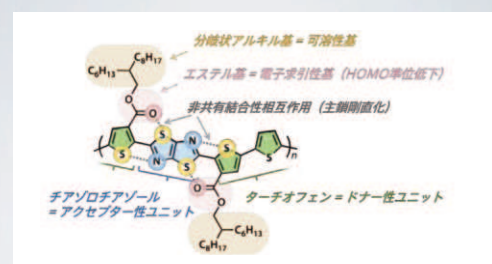
シリカゲルカラム (SGC)



シンプルな化学構造をもち少ステップで合成可能なドナー材料が報告されているが、高コスト要因となる低温反応やカラム精製などの工程を含む。

53

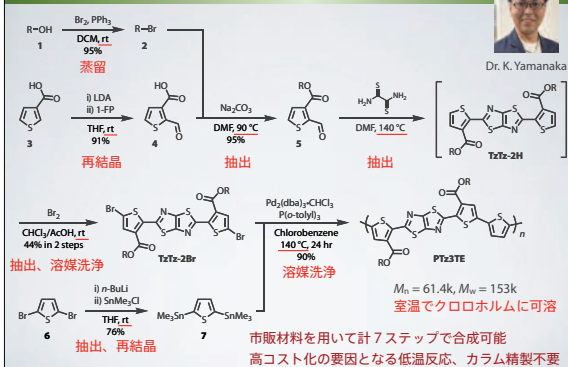
低コスト型ドナー材料 (PTz3TE)



K. Yamanaka, I. Osaka, et al., *Adv. Energy Mater.*, **2025**, 13, 2502173.

54

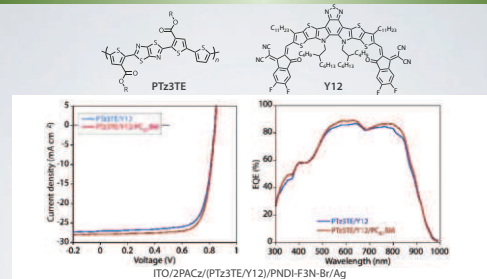
PTz3TEの合成



K. Yamanaka, I. Osaka, et al., *Adv. Energy Mater.*, **2025**, 13, 2502173.

55

PTz3TEのOPV特性



Active layer	J_{SC} (mA cm ⁻²)	V_{OC} (V)	FF	PCE (%)
PTz3TE/Y12	27.1	0.840	0.762	17.3 [16.7]
PTz3TE/Y12/PC ₆₁ BM	27.9	0.843	0.764	18.0 [17.6]

K. Yamanaka, I. Osaka, et al., *Adv. Energy Mater.*, **2025**, 13, 2502173.

56

まとめ

- OPVおよびOPDにおいて、高効率化に向けた材料設計指針は、基本的には同じ
- 結晶性や分子配向制御による高移動度化が重要
- 分子秩序性向上による無輻射再結合の抑制が鍵
- 社会実装に向けて材料コストが大きな課題