

分子機能研究部門

平 本 昌 宏（教授）（2008 年 4 月 1 日着任）

A-1) 専門領域：有機半導体，有機太陽電池，有機エレクトロニクスデバイス

A-2) 研究課題：

- a) *pn* ホモ接合有機太陽電池
- b) バンド伝導性有機半導体を用いた有機太陽電池

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 有機太陽電池では，ドナー（D）／アクセプター（A）の2種類の半導体材料を用いて励起子を解離するが，D/A のエネルギー差に起因する電圧ロスが大きい問題がある。そこで今回，電子とホール両方に対して高移動度を示す両極性の有機半導体である，ジインデノペリレン（DIP）1種類のみを用いた有機太陽電池を作製した。DIP 層に，アクセプターとドナードーパント（ MoO_3 , Cs_2CO_3 ）をそれぞれ共蒸着することで，*pn* ホモ接合を形成した。ドーピング濃度 5%において，ノンドープに比べて 8 倍の短絡電流密度の増加を観測した。内蔵電界が接合界面の数分子に集中し，隣接分子の HOMO, LUMO が電荷分離エネルギー関係になり，30% の非常に高い内部量子効率で励起子を解離する機構を提案し実証した。以上のように，有機太陽電池においても，単結晶シリコンと同様に，1種類の半導体に *pn* 接合を形成して高効率で光電変換を起こすことができることを実証した。
- b) バンド伝導性を示すルブレン単結晶バルクに，アクセプター（ MoO_3 ）を 5 ppm の極微量ドーピングし，生成キャリア濃度の温度依存性を Hall 効果によって測定した結果，ホール生成の活性化エネルギーとして，90 meV というかなり小さな値を観測した。同じ系において，表面ドーピングを行った場合も同様の結果が得られた。この結果は，バンド伝導有機半導体におけるドーピングでは，プラス電荷とマイナス電荷が弱く束縛された，ワニエ励起子型の状態が形成され，室温においても高効率でキャリア生成できることを示している。また，バンド伝導性有機半導体の超高速移動度を利用して，基板に水平方向にキャリアを取り出す水平 2 層セルを作製し，驚異的な水平距離 1.3 mm のキャリア輸送に成功し，開放端電圧 1.0 V，曲線因子 0.48 の美しい光起電力特性を観測した。
バンド伝導有機半導体は，キャリア生成，キャリア輸送において，これまでにない性能を示し，新しい有機太陽電池材料として非常に有望である。

B-1) 学術論文

M. KIKUCHI, S. MAKMUANG, S. IZAWA, K. WONGRAVEE and M. HIRAMOTO, “Doped Organic Single Crystal Photovoltaic Cell,” *Org. Electron.* **64**, 92–96 (2019).

M. KIKUCHI, M. HIROTA, T. KUNAWONG, Y. SHINMURA, M. ABE, Y. SADAMITSU, A. M. MOH, S. IZAWA, M. IZAKI, H. NAITO and M. HIRAMOTO, “Lateral Alternating Donor/Acceptor Multilayered Junction for Organic Solar Cells,” *ACS Appl. Energy Mater.* **2**, 2087–2093 (2019).

S. IZAWA, A. PERROT, J. LEE and M. HIRAMOTO, “Organic *pn* Homojunction Solar Cell,” *Org. Electron.* **71**, 45–49 (2019).

M. KIKUCHI, S. IZAWA, N. RAI and M. HIRAMOTO, “Very Low Activation Energy for Carrier Generation of Surface Doped Organic Single Crystals Observed by Hall Effects,” *Appl. Phys. Lett.* **115**, 113301 (4 pages) (2019).

H. UENO, I. JEON, H. LIN, A. THOTE, T. NAKAGAWA, H. OKADA, S. IZAWA, M. HIRAMOTO, S. MARUYAMA and Y. MATSUO, “Li@C₆₀ Endohedral Fullerene as Supramolecular Dopant for C₆₀ Electron-Transporting Layer Promoting Efficiency in Perovskite Solar Cells,” *Chem. Commun.* **55**, 11837–11839 (2019).

S. IZAWA, N. SHINTAKU, M. KIKUCHI and M. HIRAMOTO, “Importance of Interfacial Crystallinity to Reduce Open-Circuit Voltage Loss in Organic Solar Cells,” *Appl. Phys. Lett.* **115**, 153301 (4 pages) (2019).

B-3) 総説, 著書

S. IZAWA and M. HIRAMOTO, “Doping for Controlling Donor/Acceptor Interfacial Structure in Organic Solar Cells,” *The Review of Laser Engineering*, Special Issue on Recent Progress in Solar Cell Controlled by Surface Structures and Interface Between Two Materials, **47(3)**, 151–155 (2019). (in Japanese)

M. HIRAMOTO, “pn-Control of Phthalocyanine Films and Doping Sensitization,” *Kagaku Kogyo*, Special Issue on New Developments of Phthalocyanines, **70(3)**, 203–207 (2019). (in Japanese)

M. HIRAMOTO, “Development of New Concept Organic Solar Cell Using Lateral Alternating Multilayered Junction,” *Clean Energy*, **28(6)**, 48–54 (2019). (in Japanese)

M. HIRAMOTO, M. KIKUCHI and S. IZAWA, “Lateral Junction for Single Crystalline Organic Solar Cells,” in *Liquid and Single Crystals: Properties, Manufacturing and Uses*, J. Groosen, Ed., NOVA Science Publishers, Inc.; New York, Chapter 6, pp. 205–239 (2019).

B-4) 招待講演

M. HIRAMOTO, “Bandgap Science for Organic Solar Cells,” NANO TALK #10 “Advances in Photovoltaic Materials and Fabrications,” NANOTEC, Bangkok (Thailand), June 2019.

M. HIRAMOTO, “Bandgap Science for Organic Solar Cells,” 2nd International Conference on Materials Research and Innovation (ICMARI), Kasetsart University, Bangkok (Thailand), December 2019.

平本昌宏, 伊澤誠一郎, 「高移動度有機半導体を用いた有機太陽電池」, 有機エレクトロニクス研究会「有機材料・薄膜, 有機デバイス一般」, 愛知県日間賀島, 2019年1月.

平本昌宏, 「高移動度有機半導体を用いた有機太陽電池」, 有機EL討論会(第29回例会), 岡崎コンファレンスセンター, 岡崎, 2019年11月.

平本昌宏, 「有機太陽電池」, 高専-豊橋技術科学大学太陽電池シンポジウム」, 妙義グリーンホテル, 群馬県富岡市, 2019年12月.

B-6) 受賞, 表彰

平本昌宏, 応用物理学会第11回フェロー表彰(2017).

嘉治寿彦, 応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会奨励賞(2013).

嘉治寿彦, 第31回(2011年秋季)応用物理学会講演奨励賞(2011).

平本昌宏, 国立大学法人大阪大学教育・研究貢献賞(2006).

平本昌宏, 応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会論文賞 (2006).

平本昌宏, JJAP(Japanese Journal of Applied Physics) 編集貢献賞 (2004).

平本昌宏, 電子写真学会研究奨励賞 (1996).

伊澤誠一郎, 10th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10) 若手研究者講演賞 (2019).

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会幹事 (1997–1998, 2001–2002).

応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会年会講演プログラム委員 (2002–2003).

Korea-Japan Joint Forum (KJF)—Organic Materials for Electronics and Photonics, Organization Committee Member (2003–).

「有機固体における伝導性・光伝導性および関連する現象」に関する日中合同シンポジウム組織委員 (2007–2010).

応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会年会講演プログラム委員長 (2008–2009).

Fifth International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE5)(Miyazaki), Organization Committee Member (2009).

東京大学物性研究所2011年度後期短期研究会「エネルギー変換の物性科学」オーガナイザーメンバー (2011).

有機薄膜太陽電池サテライトミーティング世話人代表 (2009–2014).

The 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2010) “Organic Semiconductor Materials and Devices,” 31 May–4 June 2010, Takamatsu Kagawa, Japan, Programm Committee Member of the Session (2010).

The 40th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2013), “Organic Semiconductors and Flexible Materials,” Kobe Convention Center, Kobe, Japan, May 19–23, Program Committee Member (2013).

The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, Nov. 23–27, Program Committee Member and Chairman (2014).

27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Shiga, Japan, 12–17 Nov., Area: Organic and Dye-sensitized Solar Cells, Area Chair (2017).

第79回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋国際会議場, 名古屋, 9/20)「深化する有機半導体結晶: 量子解放の分子科学に向けて」シンポジウムオーガナイザー (2018).

応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会幹事 (2017–2018). (伊澤誠一郎)

応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会常任幹事 (2019–2020). (伊澤誠一郎)

応用物理学会若手チャプター副代表 (2018–2020). (伊澤誠一郎)

第79回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋国際会議場, 名古屋, 9/20)「深化する有機半導体結晶: 量子解放の分子科学に向けて」シンポジウム世話人 (2018). (伊澤誠一郎)

10th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10), Nara, June 25-27, 国際会議実行委員 (2019). (伊澤誠一郎)

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

科学技術交流財団(財)「有機半導体の基礎科学と有機太陽電池への応用に関する研究会」座長 (2009–2011).

京都大学化学研究所全国共同利用・共同研究拠点連携基盤専門小委員会委員 (2011–2012).

ERATO (戦略的創造研究推進事業) 追跡評価評価委員(評価委員長: 阿知波首都大学東京名誉教授)(中村活性炭素クラスタープロジェクト(2004–2009) 追跡評価) (2015.7–10).

NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構)「次世代材料評価基盤技術開発/有機薄膜太陽電池材料の評価基盤技術開発」研究評価委員会(分科会)委員(中間評価) (2015.8.19–11.4).

NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構)「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」中間評価分科会分科会長代理 (2017.8–2018.3).

学会誌編集委員

Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) 誌編集委員 (2001–2002, 2004–2007).

Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) 誌ゲストエディター (2005).

Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) 誌PVSEC27特集号 (**vol. 57**) ゲストエディター (2018).

競争的資金等の領域長等

東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究「有機半導体デバイスの基礎と応用」研究代表者 (2003–2005).

さががけ「太陽光と光電変換」研究領域 領域アドバイザー (2009–2017).

戦略的創造研究推進研究(CREST)「低エネルギー, 低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出(ACT-C)」研究領域 領域アドバイザー (2012–2018).

その他

岡崎ビジネス大賞評価委員 (2012).

岡崎ものづくり協議会学識委員 (2011–).

B-8) 大学での講義, 客員

大阪大学ナノ高度学際教育研究訓練プログラムナノ社会人教育夜間講義(平成 31年度), 大阪大学中之島センター, 「有機太陽電池(I)(II)」, 2019年1月8日.

B-9) 学位授与

菊地 満, 「Effects of Charge Carrier Transport on Device Performance of Organic Crystalline Solar Cells」, 2019年3月, 博士(理学).

B-10) 競争的資金

NEDO「太陽光発電システム未来技術研究開発」, 「超階層ナノ構造を有する高効率有機薄膜太陽電池の研究開発」, 平本昌宏(分担) (2006年–2009年).

科学技術振興機構CREST研究, 「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」, 「有機薄膜太陽電池の高効率化に関する研究」, 平本昌宏(分担) (2008年–2009年).

科研費基盤研究(B)(2), 「有機半導体のイレブンナイン超高純度化による10% 効率有機薄膜太陽電池の開発」, 平本昌宏 (2009年–2012年).

科研費挑戦的萌芽研究, 「直立超格子ナノ構造を組み込んだ高効率有機太陽電池」, 平本昌宏 (2009年–2010年).

科研費挑戦的萌芽研究, 「クロスドーピングによる有機薄膜太陽電池」, 平本昌宏 (2012年–2013年).

科学技術振興機構CREST 研究,「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域,「有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」,平本昌宏 (2009年–2015年).

科研費基盤研究(B),「共蒸着膜のpn制御による15%効率有機タンデム太陽電池の開発」,平本昌宏 (2013年–2016年).

NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構), エネルギー・環境新技術先導プログラム「pn制御有機半導体単結晶太陽電池の開発」,平本昌宏 (2015年–2016年).

科研費基盤研究(B) (一般),「有機単結晶エレクトロニクス」,平本昌宏 (2017年–2020年).

科研費挑戦的研究(萌芽),「超バルクヘテロ接合有機太陽電池の開発」,平本昌宏 (2017年–2019年).

科研費挑戦的研究(萌芽),「ドーピング有機単結晶ウェハーを用いた新原理太陽電池」,平本昌宏 (2019年–2021年).

科研費研究活動スタート支援,「混合膜中の界面構造制御による有機薄膜太陽電池の高効率化」,伊澤誠一郎 (2016年–2017年).

科研費若手研究,「超高移動度分子を用いた有機太陽電池」,伊澤誠一郎 (2018年–2021年).

マツダ財団研究助成,「理論限界に迫る有機太陽電池の実現」,伊澤誠一郎 (2018年–2020年).

中部科学技術センター学術・みらい助成,「有機太陽電池の理論限界効率への挑戦」,伊澤誠一郎 (2018年–2019年).

C) 研究活動の課題と展望

平本は, 研究員1名(谷原)を雇用し, 学生1名(Jaseela P. I. (M1), 2019.10入学)を指導し, 科研費研究テーマ「有機単結晶エレクトロニクス」及び「ドーピング有機単結晶ウェハーを用いた新原理太陽電池」を推進している。伊澤助教は, 有機太陽電池における電荷再結合抑止による電圧ロス低減, ノンフラーレンアクセプターに関する研究を強力に推進し, 学生1名(Ji-Hyun Lee (D2), 2018.10入学)を指導し, 論文量産態勢に入り, 研究室の柱になっている。今年度受け入れた国際インターンシップ生2名(Adrien Girault, Jeremy Roudin (M1, 2019.4-2019.8, Chimie ParisTech))は, 平本, 伊澤で1名ずつ分担して指導した。

密接な共同研究が増えている。高橋教授(静岡大学工学部)の研究室において合成した新規ノンフラーレンアクセプターを用いて有機太陽電池を作製評価し, 論文執筆段階に入り, 科研費を共同出願した。榎山准教授(分子研)の合成した両極性有機半導体を用いて, 両極性ドーピングと太陽電池応用の研究を進めている。

なお, 国際インターンシップ生として2017年に半年在籍したS. Makmuang (Chulalongkorn 大博士課程学生)の仕事が論文として掲載されたこともあり, 特別共同利用研究員として, 来年度1年間在籍予定。学生は海外主体となっている。国際インターンシップ学生, 共同研究は, マンパワー強化に有効で, これらを利用して研究室のアクティビティをさらに強化する。