

## ナノ分子科学研究部門（分子スケールナノサイエンスセンター）

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) 有機半導体のドーピングによる pn 制御
- b) 第3分子導入とドーピングの統合による高効率有機薄膜太陽電池の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 有機半導体における精密な pn 制御技術の確立によって初めて，有機薄膜太陽電池の本質的効率向上ができるという考えから，有機半導体のドーピングによる pn 制御を行った。n 型化ドーパントとして  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ ，p 型化ドーパントとして  $\text{MoO}_3$  および  $\text{V}_2\text{O}_5$  を用い，ほぼすべての有機半導体に対して，pn 制御が原理的に可能であることを確認した。この技術を用いて，金属電極／有機界面に高濃度ドーピングを行い，オーミック化する方法を確立した。単独の有機半導体では，ドナー／アクセプター増感がなく，生ずる光電流量が少ない。そのため，アクセプターの  $\text{C}_{60}$  とドナー有機半導体を混合した共蒸着膜に対し，3 元蒸着法を駆使して，直接 pn 制御する技術を確立した。共蒸着膜そのものを用いることで，励起子が解離しないという，有機特有の問題点が無くなり，無機太陽電池と同じ取り扱いができるようになった。この全く新しい技術を用いて，チオフェン誘導体： $\text{C}_{60}$  共蒸着膜中に，2 つの  $p^+in^+$  接合セル（+ は高濃度ドーピングを意味）を， $n^+p^+$  有機／有機トンネルオーミック接合で連結したタンデムセルを，ドーピングのみで作り込み，効率 2.4% を得た。また，ケルビン振動容量法を用いて，セルのバンドの曲がりを直接マッピングする方法を見だし，セル全体のエネルギー構造を実寸で描けるようになった。
- b) 伝導度 ( $\sigma$ ) はキャリア濃度 ( $n$ ) とキャリア移動度 ( $\mu$ ) の積で表される [ $\sigma = en\mu$ ] セル抵抗を減少させて効率向上につなげるには， $n$  と  $\mu$  の双方を増大する必要がある。キャリア濃度 ( $n$ ) は，上述 (a) のドーピングによって増大できる。キャリア移動度 ( $\mu$ ) は，昨年度，液体で，基板に付着しない第3分子を共蒸着中に共蒸発させ，共蒸着膜の結晶化／層分離を行い，ルート形成して，増大する技術を開発した。今年度，第3分子とドーピングを統合して，セル抵抗を本質的に低減し，高効率有機薄膜太陽電池を実現する研究をスタートした。 $\text{C}_{60}$ ：フタロシアニン共蒸着膜に対して，4 元蒸着によって，第3分子導入，ドーピングを同時に行った。この低抵抗共蒸着膜を電子，ホールブロック有機層でサンドイッチすることで，無機太陽電池に近い特性が得られるようになった。共蒸着膜の  $\sigma$ ， $n$ ， $\mu$  すべてを，ケルビン法と van der Pauw 4 端子法で定量的に評価する方法を確立し，セルのエネルギー設計ができるようになった。無機太陽電池と同様に，少数キャリア拡散距離が効率向上の鍵となることが分った。種々の共蒸着膜系に，本方法を適用し，本質的な効率向上につなげる。

B-1) 学術論文

Y. SHINMURA, M. KUBO, N. ISHIYAMA, T. KAJI and M. HIRAMOTO, “*pn*-Control and *pn*-Homojunction Formation of Metal-Free Phthalocyanine by Doping,” *AIP Adv.* 2, 032145 (6 pages) (2012).

M. KUBO, Y. SHINMURA, N. ISHIYAMA, T. KAJI and M. HIRAMOTO, “Invertible Organic Photovoltaic Cells with Heavily-Doped Organic/Metal Ohmic Contacts,” *Appl. Phys. Express* 5, 092302 (3 pages) (2012).

N. ISHIYAMA, M. KUBO, T. KAJI and M. HIRAMOTO, "Tandem Photovoltaic Cells Formed in Single Fullerene Films by Impurity Doping," *Appl. Phys. Lett.* **101**, 233303 (3 pages) (2012).

#### B-3) 総説, 著書

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池」 *Molecular Science*, 分子科学会, **6**, A0052 (2012).

平本昌宏, 久保雅之, 石山仁大, 嘉治寿彦, 「ドーピングによるpn制御と有機薄膜太陽電池」 「有機薄膜太陽電池の研究最前線」 松尾 豊監修, シーエムシー出版(株) 第3章第2節, pp. 122-136 (2012).

嘉治寿彦, 平本昌宏, 「液体分子同時蒸発による低分子蒸着系混合膜の結晶化」 「有機薄膜太陽電池の研究最前線」 松尾 豊監修, シーエムシー出版(株) 第4章第2節, pp. 173-180 (2012).

平本昌宏, 久保雅之, 「低分子系有機薄膜太陽電池——ドーピング技術——」 *未来材料*, 特集: プリンテッド・エレクトロニクス材料——エレクトロニクス材料における革命, エヌ・ティー・エス(株) 第12巻6号, pp. 38-43 (2012).

嘉治寿彦, 「低分子有機薄膜太陽電池のための真空蒸着法の新展開」 *応用物理学会有機分子バイオエレクトロニクス分科会誌*, **23**, pp. 39-44 (2012).

嘉治寿彦, 「分子拡散を利用した低分子有機半導体薄膜の結晶化と太陽電池応用」 *応用物理学会有機分子バイオエレクトロニクス分科会誌*, **23**, pp. 103-104 (2012).

嘉治寿彦, 「真空蒸着法の改良による有機薄膜太陽電池の光電流向上」 *月刊ディスプレイ*, 2012年7月号特集1有機系太陽電池が動き出す, (株) テクノタイムズ社, 第7章, **18**, pp. 28-34 (2012).

#### B-4) 招待講演

M. HIRAMOTO, "Organic Thin-Film Solar Cells—New-Type of Solar Cells of Printable, Paintable, and Low-Costs," Japan NANO 2012, Tokyo Big Sight, Tokyo (Japan), February 2012.

M. HIRAMOTO, "Recent Progress on Organic Thin-Film Solar Cells," The 19<sup>th</sup> International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices—TFT Technologies and FPD Materials—(AM-FPD), Ryukoku Univ. Avanti Kyoto Hall, Kyoto (Japan), July 2012.

M. HIRAMOTO, "Bandgap Science for Organic Thin-Film Solar Cells," International Workshop on Flexible & Printable Electronics (IWFPE) 2012, Muju Resort, Jeollabuk-do (Korea), November 2012.

平本昌宏, 「エネルギー問題の解決は科学者の使命——次世代の太陽電池の話——」 市民公開講座第92回分子科学フォーラム, 岡崎コンファレンスセンター, 2012年2月.

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池の基礎と将来展望」 熊本県産業技術センター第1回人材育成講演会, 熊本県産業技術センター会議室, 2012年2月.

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」 日本化学会第92春季年会, 慶応大学, 2012年3月.

平本昌宏, 「有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」 日本学術振興会結晶成長の科学と技術第161委員会第76回研究会「太陽電池材料の結晶成長技術と最新動向」 宮崎駅前KITEN 8F 会議室, 2012年5月.

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池のエネルギー構造設計とナノ構造設計」 日本学術振興会光電相互変換第125委員会次世代の太陽光発電システム第175委員会合同研究会「太陽電池材料の光電変換過程と新しい展開」 静岡大学浜松キャンパス佐鳴会館会議室, 2012年5月.

平本昌宏,「市場投入ステージに入った有機薄膜太陽電池」SEMI FORUM JAPAN 2012 オーガニックエレクトロニクスセミナー, グランキューブ大阪, 2012年6月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」CREST 有機太陽電池シンポジウム——高効率化と実用化への道——, 京都大学宇治キャンパスきはだホール, 2012年7月.

平本昌宏,「高性能有機薄膜太陽電池の誕生と進化」2012年光化学討論会プレシンポジウム「太陽エネルギーの利用拡大に向けた光化学の挑戦」光化学協会, 東京工業大学大岡山キャンパスくらまホール, 2012年9月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の基礎・設計とこれからの展開」熊本大学自然科学研究科AGEIN 学生主催特別講義, 熊本大学工学部2号館 224号室, 2012年10月.

平本昌宏,「太陽光発電技術」SEMI ジャパンSEMI Tutorial「有機系太陽電池コース」SEMI ジャパン大島ビル5F, 市ヶ谷, 東京, 2012年10月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池 基礎と応用」第4回薄膜太陽電池セミナー, 龍谷大学アヴァンティ響都ホール, 京都, 2012年10月.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池の最新研究」平成24年度KAST(神奈川科学技術アカデミー)教育講座「有機系太陽電池の実証・実用化」かながわサイエンスパークKSP ホール, 2012年12月.

平本昌宏,「有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」量子エレクトロニクス研究会「太陽電池と量子エレクトロニクス——発光デバイス・光物性の研究実績をどう生かすか——」上智大学軽井沢セミナーハウス, 2012年12月.

嘉治寿彦,「低分子有機薄膜太陽電池のための真空蒸着法の新展開」応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会研究会「環境調和型有機デバイスのための成膜・評価技術の最前線」産業技術総合研究所臨海副都心センター, 2012年3月.

嘉治寿彦,「有機薄膜太陽電池の新しい作製手法に関する研究開発」愛知県新エネルギー産業協議会主催第6回太陽電池利活用セミナー,(公財)あいち産業振興機構, 名古屋, 2012年2月.

嘉治寿彦,「共蒸発分子誘起結晶化による有機薄膜太陽電池の短絡電流向上」応用物理学会第59回春季年会講演奨励賞受賞記念講演, 早稲田大学, 2012年3月.

嘉治寿彦,「分子拡散を利用した低分子有機半導体薄膜の結晶化と太陽電池応用」応用物理学会有機バイオエレクトロニクス分科会主催M&BE 研究会, 東京, 2012年6月.

#### B-6) 受賞, 表彰

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).

#### 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–).

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–).

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

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).

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).

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).

さきがけ「太陽光と光電変換」研究領域 領域アドバイザー (2009–).

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–).

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

大阪大学社会人人材教育プログラム, 「有機太陽電池(I)(II) (ナノ高度学際教育研究訓練プログラム講義(2012年度))」, 2012 年 10 月 30 日.

#### B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(C)(2), 「高効率有機 3 層接合型固体太陽電池の開発」平本昌宏 (2006 年–2007 年).

科研費基盤研究(C)(2), 「垂直接合型有機固体太陽電池の開発」平本昌宏 (2004 年–2005 年).

科研費基盤研究(C)(2), 「分子結晶におけるステップ構造制御と増幅型光センシングデバイス」平本昌宏 (2002 年–2003 年).

科学技術振興機構特許補完研究プログラム, 「光電流増倍現象等を利用したガス検知方法及びガスセンサー」平本昌宏 (2003 年).

科学技術振興機構シーズ育成試験, 「p-i-n 接合型有機固体太陽電池」平本昌宏 (2005 年).

科学技術振興機構産学共同シーズイノベーション化事業顕在化ステージ,「高効率有機固体太陽電池の実用化試験」平本昌宏 (2006年–2007年).

科学技術戦略推進機構アカデミアショーケース研究助成,「p-i-n 有機太陽電池の開発」平本昌宏 (2006年).

(財)関西エネルギー研究基金(KRF)助成,「有機半導体のpn制御とp-i-n 有機固体太陽電池の開発」平本昌宏 (2008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–).

科学技術振興機構先端的低炭素化技術開発(ALCA)「有機薄膜太陽電池の結晶性理想構造の共蒸発分子誘起結晶化法による実現と高効率化」嘉治寿彦 (2012年–).

#### B-11) 産学連携

共同研究(積水化学(株))「有機・無機半導体界面における半導体物性測定」平本昌宏 (2012年–2013年).

#### C) 研究活動の課題と展望

2009年10月にスタートしたCREST プロジェクト「有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」(研究代表者:平本)の遂行のために,研究員4名(久保,新村,横山,能岡)を雇用している。2012年は,嘉治助教,石山(博士3年次),中尾研究員,杉原(秘書)と私の5名とあわせ,9名のグループで研究を行った。本年度10月から,ALCA プロジェクト「有機薄膜太陽電池の結晶性理想構造の共蒸発分子誘起結晶化法による実現と高効率化」(研究代表者:嘉治)がスタートした。今後,ドーピング,ナノ構造制御の両方を,それぞれのプロジェクトで推進し,協力して有機薄膜太陽電池の高効率化を図る。CREST プロジェクトは,有機半導体のバンドギャップサイエンスの確立にほぼ目処がついたため,これをセル設計に生かして,効率向上を実際に示さなければならない。すでに,有機半導体を無機半導体なみに取り扱えるレベルに達していることから,今後,無機に多くを学ぶ必要がある。無機太陽電池の経験を持つ専門家が必要となる可能性がある。

2週に1度,1日かけて研究報告とディスカッションを強力に行っている。研究員の2名(久保,新村)は,自分で英語論文をかける実力に達している。学生の確保が引き続き重要課題として残っている。