

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 制御と高効率有機薄膜太陽電池の開発
- b) 第3分子導入による普遍的な共蒸着膜のナノ構造制御

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 制御を行っている。今回，典型的な有機半導体である C_{60} とメタルフリーフタロシアニンについて，ドーピングによる pn 制御と pn ホモ接合の形成技術を確立した。n 型化ドーパントとして Cs_2CO_3 および Ca，p 型化ドーパントとして MoO_3 および V_2O_5 を見いだした。今回の結果は，ほぼすべての有機半導体に対して，pn 制御，pn ホモ接合形成が一般的に可能であることを示している。

高抵抗の有機薄膜太陽電池には，アモルファスシリコン太陽電池に用いられる，pin エネルギー構造が適していると考え，pn ホモ接合 C_{60} セルの中間に Intrinsic 層としてふるまう，アクセプター性とドナー性の2種のドーパントを同時にドーブ（クロスドーブ）した中間層を挿入することを試み， C_{60} 単独セルで動作確認した。

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。そこで，アクセプターの C_{60} にドナー有機半導体を混合した共蒸着膜に対して，pn 制御，および，pn，pin ホモ接合などの形成を試み，有機薄膜太陽電池に対して，最適な接合構造を探っている。今回，典型的な共蒸着層の組み合わせである，チオフェン誘導体： C_{60} およびフタロシアニン： C_{60} 共蒸着膜において pn 制御技術を確立した。その結果，低抵抗 p 型層，n 型層，pn ホモ接合，ハイドーブ p^+/n^+ オーミック接合，p 型，n 型ショットキー接合が自由自在に作製できるようになった。その結果，ドーピングのみでタンデム接合セルを作製することに成功した。

今後，以上の様々な接合を組み合わせ，光を充分吸収できる厚膜共蒸着セルで，pn ホモ接合，pin 接合，タンデム接合などを持つ高効率セルに展開する。

- b) 伝導度 (σ) はキャリア濃度 (n) とキャリア移動度 (μ) 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 μ の双方を増大する必要がある。上述成果 (a) のドーピング技術は，共蒸着膜のキャリア濃度 (n) の増大に対応する。一方，共蒸着のナノ構造制御による，光生成ホールおよび電子のルート形成は，共蒸着膜のキャリア移動度 (μ) の増大に対応する。

今回，共蒸着中の第3分子の導入によって，どのような有機半導体の組み合わせにも普遍的に適用できる，共蒸着膜のナノ構造制御方法を開発した。第3分子として，液体で，基板加熱下で，基板に付着しない有機分子を共蒸着中に3元蒸着によって共蒸着させた。

検討したすべての共蒸着分子の組み合わせにおいて，例外なく光電流の顕著な増大が観測された。共蒸着膜は，通常分子レベル混合となるが，第3分子導入によって各成分の結晶化が促進されて，相分離を起こし，光生成電子とホールのルートが形成されるようになり光電流増大につながったことを確認した。今後，第3分子の蒸着速度，基板温度，

基板への入射角度等のパラメータの精密コントロールによって、セル性能を飛躍的に向上できると考えている。
本研究は、有機薄膜太陽電池の第一人者である米国ロチェスター大 Ching Tang 教授との共同研究である。

B-1) 学術論文

M. HIRAMOTO, K. KITADA, K. IKETAKI and T. KAJI, “Near Infrared Light Driven Organic p-i-n Solar Cells Incorporating Phthalocyanine J-Aggregate,” *Appl. Phys. Lett.* **98**, 023302 (3 pages) (2011).

K. IKETAKI, T. KAJI, S. NAKAO and M. HIRAMOTO, “Structural Studies of the Codeposited *i*-Layer of ZnPc:C₆₀ p-i-n Solar Cells,” *Phys. Status Solidi C* **8**, 637–639 (2011).

M. KUBO, K. IKETAKI, T. KAJI and M. HIRAMOTO, “Conduction Type Control of Fullerene Films From n- to p-Type by Molybdenum Oxide Doping,” *Appl. Phys. Lett.* **98**, 073311 (3 pages) (2011).

T. KAJI, M. ZHANG, S. NAKAO, K. IKETAKI, K. YOKOYAMA, C. W. TANG and M. HIRAMOTO, “Co-Evaporant Induced Crystalline Donor:Acceptor Blends in Organic Solar Cells,” *Adv. Mater.* **23**, 3320–3325 (2011).

H. YAMANE, T. HATSUI, K. IKETAKI, T. KAJI, M. HIRAMOTO and N. KOSUGI, “Site-Specific Intermolecular Interaction in α -Phase Crystalline Films of Phthalocyanines Studied by Soft X-Ray Emission Spectroscopy,” *J. Chem. Phys.* **135**, 034704 (6 pages) (2011).

M. KUBO, T. KAJI and M. HIRAMOTO, “pn-Homojunction Formation in Single Fullerene Films,” *AIP Advances* **1**, 032177 (2011).

N. ISHIYAMA, M. KUBO, T. KAJI and M. HIRAMOTO, “Doping-Based Control of the Energetic Structure of Photovoltaic Co-Deposited Films,” *Appl. Phys. Lett.* **99**, 133301 (3 pages) (2011).

B-3) 総説，著書

平本昌宏, 「炭素物質を共蒸着層に用いる太陽電池の特性」, 「炭素学——基礎物性から応用展開まで」, 田中一義, 東原秀和, 篠原久典, 編集, 化学同人, 第14章5. 2節, pp. 460–470 (2011).

平本昌宏, 「低分子型有機太陽電池の耐久性向上・長寿命化に向けた取り組み」, 「有機デバイス・材料の耐久性向上および長寿命化技術」, 情報機構(株) pp. 142–146 (2011).

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池の高効率化に向けた革新的取り組み——J 会合体を用いた近赤外利用技術——」, 特集: 次世代太陽電池開発の最前線, 月刊 ケミカルエンジニアリング, 化学工業社(株) **56**, 34–37 (2011).

平本昌宏, 「有機太陽電池の動作原理」, 実用化に動き出した有機薄膜太陽電池の研究開発最前線, 工業材料, **59**(9), 23–26 (2011).

嘉治寿彦, 平本昌宏, 「Co-evaporant induced crystalline donor:acceptor blends in organic solar cells」, *Interface Newsletter 2011* (界面科学技術機構会誌) 界面科学技術機構 (2011) (*Advanced Materials*, **23**, 3320–3325 (2011) より転載)

B-4) 招待講演

M. HIRAMOTO, “Organic p-i-n Cell Solar Cells Incorporating Seven-nine Purified Fullerene,” UK-Japan Nanoelectronics Workshop (by British Embassy, Tokyo, and National Institute for Material Science (NIMS)), February 2011.

M. HIRAMOTO, “Photovoltaic Energy Development—Organic Thin-film Solar Cells—,” Chimie Paristech—IMS 2nd Joint Symposium: “Frontier in Molecular Science based on Photo and Material,” Chimie Paristech, Paris (France), November 2011.

T. KAJI, "Co-evaporant induced crystallization of donor:acceptor blends in organic solar cells," BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T, Dalian (China), October 2011.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池」金沢大学理工研究域「サステナブルエネルギー研究センター」第1回有機薄膜太陽電池部門,金沢大学イノベーション創成センター・セミナー室,2011年1月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の基礎」さきがけ「太陽光と光電変換機能」研究領域第3回領域会議,八ヶ岳国際ホテル,2011年1月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の基礎と最近の進展」第40回記念フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム,名城大学天白キャンパス,2011年3月.

平本昌宏,「高効率有機薄膜太陽電池の実現に向けて」分子科学研究所 - 豊田中央研究所研究交流会,豊田中央研究所,2011年6月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池におけるバルク接合界面」第5回分子科学会シンポジウム「埋没界面が分子科学に何をもたらすか」岡崎コンファレンスセンター,2011年6月.

平本昌宏,基礎講座「有機薄膜太陽電池の基礎」日本学術振興会第175委員会,第8回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム,岐阜じゅうろくプラザ,2011年7月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池における光電変換」ソニー株式会社先端マテリアル研究所(厚木第2テクノロジーセンター)2011年7月.

平本昌宏,「有機太陽電池の最前線——無機の発想を有機に——」先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会平成23年度第1回研究会ナノ・ハイスループット分科会,大阪大学先端科学イノベーションセンター,2011年8月.

平本昌宏,嘉治寿彦(代理)「有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」2011年秋季第72回応用物理学会シンポジウム「太陽電池技術の最新の動向」29p-M-6,山形大学小白川キャンパス,2011年8月.

平本昌宏,「実用化・市場投入ステージに入った有機薄膜太陽電池」2011年秋季第72回応用物理学会,特定テーマ「有機太陽電池」(有機分子・バイオエレクトロニクス分科内総合講演)1p-L-1,山形大学小白川キャンパス,2011年9月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の開発」名古屋工業大学 - 分子科学研究所合同講演会,名古屋工業大学23号館,2011年10月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の効率10%越えのためのシナリオ」有機デバイス研究会第87研究会「有機薄膜太陽電池の進展」北九州工業高等専門学校,2011年10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」2011年度後期物性研究所短期研究会「エネルギー変換の物性科学」東京大学物性研究所第一会議室,2011年11月.

嘉治寿彦,「共蒸発分子により誘起する有機太陽電池のドナー:アクセプター混合層の結晶化」第2回 共役系有機エレクトロニクス材料の開発・応用に関する研究会,名古屋大学,2011年12月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の基礎と応用」PV-Japan 2011 SEMI-Tutorial「太陽光発電技術(有機太陽電池コース)東京,幕張メッセ国際会議場302会議室,2011年12月.

平本昌宏,「実用化ステージに入った有機薄膜太陽電池」第5回有機エレクトロニクス研究会講演会——有機系太陽電池の現状と将来展望——,福岡市,リファレンス駅東ビル7F D会場,2011年12月.

平本昌宏,「有機太陽電池:基礎から応用展望まで」第15回NAIST 科学技術セミナー「グリーン・デバイス・テクノロジー」奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科大講義室,2011年12月.

B-5) 特許出願

特願 2011-088465, 「有機混合膜の共蒸着液体を用いた結晶化法」 嘉治寿彦, 平本昌宏(自然科学研究機構) 2011年.

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).

有機薄膜太陽電池研究会代表 (2009-).

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).

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-).

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-2010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).

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-).

B-11) 産学連携

共同研究(ソニー(株))「有機光電変換に関する研究」平本昌宏 (2011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」の遂行のために、CREST 研究員4名(久保,新村,横山,能岡)を雇用している。現在、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ている。有機半導体の電気物性を精密に評価するには、空気からの酸素、水の影響を除くことが非常に重要で、クリーンルーム内にグローブボックス内蔵蒸着装置1台を増強し合計3台とした。他の4蒸着源蒸着装置4台とあわせ、各研究者が1つの蒸着装置を常時使用できる態勢を整え、研究の効率化をはかっている。2週に1度、1日かけて研究報告とディスカッションを密に行っている。今年度、A-3に記した、基礎的に重要な成果をいくつか得ることができ、研究室のactivityが着実に上がっている。今後、よりactivityを高めるためには、インパクトのある成果を生み出して、次のプロジェクトにつなげること、研究室のHPをさらに充実させ、積極的な広報を通じて、学生の確保につなげることが重要である。

有機薄膜太陽電池は、2011年6月に、三菱化学より効率10%が報告され、実用化のステージに達した。私は、21世紀の基幹産業となる、エネルギー・環境分野において、有機薄膜太陽電池の実用化をその1つの解答として提示しようと考えている。有機薄膜太陽電池においては、有機半導体物性物理の確立という基礎研究にもとづいて、ブレイクスルーを起こし、その結果として、高効率化を達成していくことが求められる。基礎と応用の連携によって、基礎研究-実用化の間に横たわるデスバレーを突破しなければならない。

具体的研究テーマとして、以下の項目を強力に推進していく。有機半導体の超高純度化とドーピングによるpn制御技術の確立、有機太陽電池の内蔵電界形成技術の確立、セル内部抵抗の低減、金属/有機オーミック接合形成技術の確立、有機半導体物性評価法の確立、現在パーコレーションに頼っている共蒸着i層ナノ構造の設計・製作技術の確立、近赤外を利用でき、1V程度の開放端電圧を示す、新しい有機半導体の開発。なお、項目の達成のためには合成グループとの連携が必要で、産総研と東大との共同研究を行っている。2014年度のCREST終了までに、低分子系有機太陽電池の効率15%を目指す。