

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) 超高純度化有機半導体を用いた有機薄膜太陽電池
- b) p-i-n 有機太陽電池の共蒸着 i 層ナノ構造の設計
- c) 有機半導体の pn 制御

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 有機半導体もシリコンと同じ半導体であるので，その真の性質，機能を見いだして実用デバイスに利用するには，精製によって，シリコンと言われるイレブンナイン（11N）並みに，超高純度化する技術が欠かせない。我々のグループでは，純度セブンナイン（99.99999%，7N）以上の C₆₀ や H₂Pc（無金属フタロシアニン）のサイズ 2 cm に達する単結晶の作製に成功した。これらの 7N 有機半導体を用いて有機 p-i-n 接合セルを作製すると，共蒸着 i 層をこれまでに例のない 1 ミクロンという厚膜にでき，シリコン太陽電池とほぼ同等の，20 mA/cm² 近い短絡光電流 (J_{sc})，低分子系シングルセルで世界最高の変換効率 5.3% を達成した。

上記の高純度化技術を用いて，近赤外に感度を有する有機薄膜太陽電池を作製した。シリコン太陽電池は 1100 nm までの近赤外まで感度を持っているが，有機太陽電池は，これまで 700 nm までの可視域にしか感度を持っていなかった。今回，我々のグループでは，鉛フタロシアニンと C₆₀ の共蒸着による活性層によって，700 nm から 1000 nm の近赤外域に感度を持つ有機太陽電池を初めて作製することに成功した。

有機半導体の組み合わせを変えることで，セルの開放端電圧 (V_{oc}) を増大させることが可能である。アクセプターとして働く C₆₀ に組み合わせるドナーとして，上述の H₂Pc の代わりに，ポルフィリン，チオフェンオリゴマーを検討し，H₂Pc が示す 0.4 V の倍の 0.8 V の V_{oc} を観測している。現在，共蒸着 i 層を持つ p-i-n 接合セルへの展開を行っている。

- b) p-i-n 接合セルの効率は，共蒸着 i 層のナノ構造と深い関係がある。今回，FIB-TEM によって，上述の効率 5.3% を示した 1 μm 厚の共蒸着 i 層のナノ構造の詳細を明らかにした。その結果 20–30 nm の直径のウィスカー状の結晶が，金属電極に対して垂直方向に伸びた構造が観察された。これまでの結果から，柱状の H₂Pc 結晶がアモルファス C₆₀ に取り囲まれていると考えている。20 nm の直径は，励起子が H₂Pc/C₆₀ 界面にほぼ到達できる距離である。また，ウィスカー H₂Pc 結晶が電極をつなぐ方向に伸びていることは，理想に近い，ホール輸送ハイウェーが形成できていることを強く示唆している。なお，亜鉛フタロシアニン (ZnPc)/C₆₀ 系においても，同様の ZnPc ウィスカーによるホール輸送ハイウェーの形成を示唆する結果が得られた。
- c) 有機半導体を実用レベルのデバイスに応用して行くためには，伝導タイプの制御，すなわち，pn 制御が必要不可欠である。特に，有機半導体においては，n 型化できるドナー性ドーパントがほとんど知られていない。今年度は，その初歩として，水素 (H₂) ドーピングの効果について検討した。C₆₀ 単独膜，C₆₀:H₂Pc 共蒸着膜を 10⁻⁴ Torr の水素導入下で蒸着して作製すると，短絡光電流 (J_{sc}) と開放端電圧 (V_{oc}) が約 2 倍となり，太陽電池特性が大きく向上した。この結果は，C₆₀ のフェルミレベルがマイナスシフトし n 型化したと解釈することで合理的に説明できた。現在，他のドナー性ドーパントとして，Li 内包 C₆₀ 等を検討している。

B-2) 国際会議のプロシーディングス

M. HIRAMOTO, “Organic p-i-n Solar Cells Incorporating Seven-nine Fullerene,” Proceedings of 2nd Global COE International Symposium on Electronic Devices Innovation (EDIS2009), Dec. 7, Osaka, Japan, pp. 85–86 (2009).

B-3) 総説, 著書

平本昌宏, 「有機太陽電池の効率化と耐久性評価」, 「新概念太陽電池と製造プロセス」第3章 色素増感太陽電池, 有機太陽電池, 第6節, 宮坂 力監修, シーエムシー出版(株) pp. 123–130 (2009).

平本昌宏, 「有機太陽電池」, 「電子情報通信学会知識ベース S2群2編ナノエレクトロニクス」4章有機ナノエレクトロニクス, 第4節 (2009).

平本昌宏, 「ZnO 保護層を持つ有機薄膜太陽電池」特集「太陽電池に関する技術開発トレンド—2009—」, *Material Stage* Vol. 9, No. 3, pp. 96–99 (2009).

平本昌宏, 「変換効率 10% の可能性, 有機薄膜太陽電池の開発動向, 可視領域の太陽光をすべて吸収できる p-i-n 接合セル, 有機半導体の超高純度化により変換効率 5.3% を達成」, *Semiconductor FPD World (Technology plus)* 「次世代太陽電池技術の開発」, プレスジャーナル, 6月号, pp. 48–49 (2009).

平本昌宏, 「弾道電子放出顕微鏡の電子注入バリア計測による有機デバイスの評価」, 「有機デバイスのための界面制御と制御技術」, シーエムシー出版, pp. 111–117 (2009).

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池——有機半導体超高純度化と長期動作テスト」, 「2010年太陽光発電技術大全」第2編太陽光システムの設計・製造・施工技術, 第1章第5節, 電子ジャーナル(株) (2009). (CD-ROM 版)

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池の開発」, *SOLAR POWER* 特集, 電波新聞社 (JEI) 10月号 (2009).

平本昌宏, 「低分子系有機薄膜太陽電池」, *日本写真学会誌* 72(5), 10月 (2009).

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池の最近の進展——近赤外利用技術——」, *未来材料*, 9(11), pp. 16–20 (2009).

B-4) 招待講演

M. HIRAMOTO, “Development of organic p-i-n junction solar cells,” Core-to-core Winter School “Organic Crystals,” Nagoya Univ., January 2009.

M. HIRAMOTO, “Development of Organic p-i-n Solar Cells,” Department Seminar of UCLA Materials Science and Engineering, Los Angeles (U.S.A.), April 2009.

M. HIRAMOTO, “Organic p-i-n Solar Cells Incorporating Seven-nine Purified Fullerene,” The 4th East Asia Symposium on Functional Dyes and Advanced Materials (EAS4), International House, Osaka (Japan), June 2009.

M. HIRAMOTO, “Current Status of Research on Organic Thin-Film Solar Cells,” NIMS Week 09 Satellite Symposia “Highly Efficient Utilization of Solar Energy Featuring Advanced Photovoltaics,” Tsukuba International Congress Center, July 2009.

M. HIRAMOTO, “Organic p-i-n Solar Cells Incorporating Seven-Nine Purified Fullerene,” ISSP Workshop “Physics and New Phenomena of π -electronic Interfaces,” The Institute for Solid-State Physics (ISSP), Kashiwa Campus, Univ. Tokyo, August 2009.

M. HIRAMOTO, “Organic p-i-n Solar Cells Incorporating Seven-Nine Fullerene,” 2nd Global COE International Symposium Electronic Devices Innovation, EDIS2009 “Global Workshop on Organic Thin-Film Solar Cell,” December 2009.

M. HIRAMOTO, "Solar Cells Using Organic Semiconductors," The 4th Winter School of Asian CORE—New Perspectives in Material, Photo and Theoretical Molecular Sciences, Seoul National University, Seoul (Korea), December 2009.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の現状と将来」表面科学技術研究会2009「進化する太陽電池とトータルエコロジー——省資源・環境・代替——」神戸大学瀧川記念学術交流会館, 2009年1月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池(低分子系)」日本学術振興会分子系の複合電子機能第181委員会第3回委員会, 東京大学, 2009年1月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池におけるp-i-nバレルヘテロ接合界面」日本真空学会2月研究例会/日本表面科学会第61回表面科学研究会「有機半導体素子における界面制御」機械振興会館, 東京, 2009年2月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の開発」PV EXPO2009, 第2回国際太陽電池展PV-6「開発が本格化してきた革新次世代太陽電池技術」東京ビッグサイト, 2009年2月.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池」東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究「有機ヘテロ接合太陽光発電デバイスの研究」東北大学電気通信研究所ナノ・スピン実験施設, 2009年3月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の研究開発の現状」電子情報通信学会シンポジウム「環境・エネルギー問題の解決に貢献する有機材料——有機エレクトロニクスからの提案」愛媛大学, 2009年3月.

平本昌宏,「効率10%を超える有機太陽電池を目指して」応用物理学会2009春シンポジウム「イントロダクトリートーク: 効率10%の可能性が出てきた有機薄膜太陽電池」筑波大学, 2009年4月.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池」有機薄膜太陽電池サテライトミーティング, 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター, 2009年4月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の研究開発の現状」(財)化学技術戦略推進機構(JCII)マルチスケールCP研究会, 東京, 2009年4月.

平本昌宏,「超高純度有機半導体による高効率有機薄膜太陽電池」日本学術振興会薄膜第131委員会第245研究会, 新大阪ワシントンホテルプラザ, 2009年4月.

平本昌宏,「超高純度有機半導体を持った高効率有機薄膜太陽電池」大阪府立大学21世紀科学研究機構分子エレクトロニックデバイス研究所第3回研究会「有機太陽電池の今後と展望——機能性電子系の基礎と応用——」大阪府立大学中之島サテライト講義室, 2009年6月.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池」09-2ポリマーフロンティア21「有機薄膜太陽電池」東京工業大学百年記念館フェライト会議室, 2009年6月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池における界面の問題」第3回分子科学会シンポジウム, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2009年6月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の現状と将来」第6回日本写真学会光機能性材料セミナー——有機デバイスの耐久性に関わる科学——, 東京工業大学100年記念館フェライト会議室, 2009年6月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の現状と将来」豊田中央研究所(株)2009年6月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の開発動向と今後の展望」日本インダストリーセンター講座, 東京京橋区民館, 2009年7月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池技術に関する基礎から今後の展望, 特に10%越えに向けた技術戦略」帝人融合研究所, 2009年7月.

平本昌宏,「近赤外に感度を有するPIN型有機薄膜太陽電池」CREST有機太陽電池シンポジウム——光・ナノ・バイオ技術から光電変換機能へ——, 京都大学百周年時計台記念館, 2009年7月.

平本昌宏,「有機太陽電池の問題点におけるショート講演」第一回「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」(財)科学技術交流財団,愛知県産業貿易館,2009年7月.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池の基礎と将来展望」第45回(2009秋)応用物理学会スクール「有機太陽電池の現状と将来展望」富山大学,2009年9月.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池の現状と将来」第58回高分子討論会「新電池と高分子の接点——太陽電池・燃料電池」熊本大学,2009年9月.

平本昌宏,「有機太陽電池の可能性と現状」岡山大学理学部コラボレーション棟,2009年10月.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池の最近の進展」応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会講習会「分子エレクトロニクスのニュートレンド」産業技術総合研究所臨海副都心センター,2009年11月.

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」第24回高分子エレクトロニクス研究会講座「エネルギーを支えるデバイス技術の新展開」東京理科大学森戸記念館,2009年11月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の最新技術」第34回顔料物性講座「エコロジーを実現するための顔料応用技術」東京塗料会館,2009年11月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の現状と将来」第30回表面科学セミナー「グリーンテクノロジー,表面科学の新たな挑戦」東京理科大学森戸記念館,2009年11月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の現状と将来」高分子学会関東支部湘北地区懇話会,旭硝子(株)AGCモノ作り研修センター,2009年11月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の現状と将来」第20回光物性研究会,大阪市立大学学術情報総合センター,2009年12月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池における分子技術の重要性」科学技術未来戦略ワークショップ「分子技術」科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CDRS)東京,2009年12月.

B-6) 受賞,表彰

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).

文部科学省，學術振興會，大學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

日本学術振興会科研費基盤研究(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).

日本学術振興会科研費基盤研究(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).

科研費基盤研究(B)(2),「有機/金属界面のナノレベル構造制御と光電流増倍デバイス」平本昌宏(1977年-1998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).

日本学術振興会科研費基盤研究(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).

日本学術振興会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(三洋電機)「高純度新規電子供与性材料による高効率有機薄膜太陽電池の作製」平本昌宏(2009年).

共同研究(クラレ(株))「有機薄膜太陽電池素子の高効率化」平本昌宏(2009年).

C) 研究活動の課題と展望

2008年4月に分子研に着任後，研究室の立ち上げは2008年度中にほぼ終了した。最初の研究室メンバーは，嘉治助教，池滝IMSフェロー，中尾研究員と私の4名で非常に小さなグループであったが，2009年度に，安念(秘書)，石山(博士1年次)，中山(研究員)の3名を増強し，7名態勢とした。2009年に，JST/CREST 研究領域「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」の研究代表者(研究課題名「有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」として採択されたため，有機半導体の物性物理学の確立と有機太陽電池応用のための研究資金として有効に活用し，また，CREST 研

研究員の2 - 3名の増強を考えている。学生が少ないため、学生の確保が今後大事と考えている。

近年の、グリーンニューディール政策に代表されるように、エネルギー・環境関係の研究が社会的に非常に注目を集めており、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が不可欠であり、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。有機半導体を単結晶析出によってイレブンナインまで超高純度化する技術の確立、ppm-ppbレベルの純度を精確に評価する技術の確立、有機半導体の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、金属/有機界面の基礎研究とそれをオーミック接合化する技術の確立、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、近赤外を利用できる有機半導体、1V程度の開放端電圧を示す有機半導体の開発、など。数年内に、低分子系有機太陽電池の効率10%を目指す。