

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) 有機薄膜太陽電池の長期動作試験
- c) 近赤外域に感度を有する有機薄膜太陽電池

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，有機半導体を1気圧の窒素気流中で昇華精製することで，大きな有機単結晶の形で取り出し，精製効率を格段に向上させることに成功した。例えば， C_{60} の場合，数ミリ角の単結晶が得られ，純度はセブンナイン（99.99999%，7N）以上であることを確認した。7N- C_{60} と5N- H_2Pc （無金属フタロシアニン）の共蒸着i層を有する，p-i-n接合セル [Ag/NTCDA(透明n層：600 nm)/ C_{60} : H_2Pc (共蒸着i層：1ミクロン)/ H_2Pc (p層：30 nm)] において，曲線因子（FF）の値は，共蒸着i層膜厚1ミクロンという驚くべき厚さでも低下せず，セルは黒茶色で，可視域の太陽光をほぼ100%吸収利用できたため，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} ），世界最高の変換効率5.3%を観測した。なお，低純度 C_{60} を用いたp-i-nセルでは，共蒸着i層を130 nmを越えて厚くすると，セルの内部抵抗が増大して，深刻なFF， J_{sc} の低下が起きるため，可視光すべてを吸収利用できず， J_{sc} は10 mA/cm²どまりで高効率は得られない。以上の結果は，有機半導体の電子材料レベルの高純度化が，セル性能の本質的な向上にいかにより重要であるかを示している。
- b) 有機薄膜太陽電池の実用化のためには，長期動作を実証する必要がある。今回は，p-i-n接合セルを，透明電子輸送層として働く，AlドープZnO（AZO）で被覆し，長期動作試験を行った。セル構造は，[Ag(100 nm)/AZO(50 nm)/In(20 nm)/ C_{60} (50 nm)/ H_2Pc : C_{60} 共蒸着i層(100 nm)/ H_2Pc (15 nm)/ITO]である。AZOは，空気導入下（ 10^{-4} Torr），基板温度+50 °Cにおいて，電子ビーム蒸着によって有機薄膜上に堆積した。伝導度は 3.7×10^3 Scm⁻¹で，ITOに匹敵する値が得られた。AZOは，シヨート防止層として非常に有効で，面積1 cm²のセルを歩留まり良く作製できた。高真空（ $< 10^{-7}$ Torr），短絡状態光照射下での，1000時間（42日）動作テストを行ったところ，42日（1000時間）後も，効率低下は5%内におさまっており，ほぼ安定動作を実証できた。
- c) 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 C_{60} 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。外部量子収率は900 nmで約50%に達した。可視域に感度を持つセル（結果(a)）と，本セルを組み合わせることで，20 mA/cm²を越える短絡光電流（ J_{sc} ）の実現も可能と考えている。

B-1) 学術論文

K. SAKAI and M. HIRAMOTO, “Efficient Organic p-i-n Solar Cells Having Very Thick Codeposited i-Layer Consisting of Highly Purified Organic Semiconductors,” *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **491**, 284–289 (2008).

H. SHIOKAWA and M. HIRAMOTO, “Nanostructure Control by Interlaminated Fullerene/Phthalocyanine Ultrathin Films in p-i-n Organic Solar Cells,” *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **491**, 277–283 (2008).

B-2) 国際会議のプロシーディングス

M. HIRAMOTO, “Efficient Organic p-i-n Solar Cells Having Very Thick Codeposited i-Layer Composed of Highly Purified Organic Semiconductors,” *Proc. SPIE Vol. 7052*, Organic photovoltaics IX, 70520H-1–6 (2008).

B-3) 総説, 著書

平本昌宏, 「有機太陽電池」*応用物理(基礎講座)* **77**(5), 539–544 (2008).

平本昌宏, 「超高純度有機半導体を用いた高効率有機薄膜太陽電池」*機能材料(特集企画「有機薄膜太陽電池の最新動向」)* シーエムシー出版, **28**(6), 25–32 (2008).

平本昌宏, 「実用化に向けた有機薄膜太陽電池技術動向」*ディスプレイ(特集「燃料電池・太陽電池」)* **14**(10), 34–38 (2008).

平本昌宏, 「低分子系有機固体太陽電池の開発」*化学工業* **59**(10), 776–781 (2008).

平本昌宏, 「有機薄膜太陽電池の現状と将来」*未来材料(特集: エネルギー化学材料・デバイスの現状と将来)* **8**(12), 25–30 (2008).

平本昌宏, 「有機半導体の超高純度化による高効率有機薄膜太陽電池」*Molecular Electronics & Bioelectronics*, **19**(4), 221–230 (2008).

平本昌宏, 「有機太陽電池」*「プリンタブル有機エレクトロニクスの最新技術」* 第7章第6節, シーエムシー出版(株) pp. 220–230 (2008).

平本昌宏, 「分子袋小路の概念と有機増幅型光センサー」*「有機薄膜形成とデバイス応用展開」* 第2章ドライプロセスによる薄膜形成技術とデバイス応用 第7節, シーエムシー出版(株) pp. 70–79 (2008).

平本昌宏, 「有機太陽電池の高効率化と耐久性評価」*「新世代(プリンタブル)太陽電池——印刷プロセスと材料技術」* 第3章第5節色素増感太陽電池, 有機太陽電池, シーエムシー出版(株) pp. 220–230 (2008).

B-4) 招待講演

M. HIRAMOTO, “Efficient organic p-i-n solar cells having very thick codeposited i-layer composed of highly purified organic semiconductors,” *SPIE Vol. 7052*, Organic photovoltaics IX, San Diego (U.S.A.), August 2008.

M. HIRAMOTO, “Efficient Organic p-i-n Solar Cells Having Very Thick Codeposited i-Layer Using Seven-Nine Purified Fullerene,” 8th International Conference on Nano-Molecular Electronics, Kobe Portpia Hotel, Kobe (Japan), December 2008.

平本昌宏, 「有機太陽電池の界面制御技術と実用化への課題」*JCII 界面制御による化学と電子工学の融合研究会(第2回)——電子材料の極限構造制御と超機能発現——「次世代有機電子デバイス・材料開発」実用化への期待(財)化学技術戦略推進機構(JCII)* 東京, 2008年3月.

平本昌宏,「実用化に向けた有機薄膜太陽電池技術動向」オルガテクノプレセミナー「フィルム型太陽電池技術動向——有機薄膜太陽電池の現状と未来」お茶の水「総評会館」東京,2008年4月.

平本昌宏,「低分子系有機薄膜太陽電池の現状と動向」電子ジャーナル193回技術セミナー:有機薄膜太陽電池徹底解説,お茶の水「総評会館」東京,2008年6月.

平本昌宏,「わかりやすく解説:有機薄膜系太陽電池」プレスジャーナル太陽電池入門セミナー,学士会館,東京,2008年6月.

平本昌宏,「Efficient organic p-i-n solar cells having very thick codeposited i-interlayer consisting of highly purified organic semiconductors」第5回「次世代の太陽光発電システム——薄膜太陽電池のイノベーションと地域連携——」宮崎市民プラザ,2008年6月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の現状技術と将来」自然順応型ネオマテリアル創成研究会新エネルギー技術創成研究会第1回合同研究会——新エネルギー分野での材料資源枯渇対策(減量・代替技術)——,大阪リバーサイドホテル,2008年7月.

平本昌宏,「超高純度有機半導体を用いた高効率有機薄膜太陽電池」第4回有機太陽電池シンポジウム——ハイブリッドソーラーセルへの展開——,京大会館,2008年7月.

平本昌宏,「超高純度有機半導体を用いた低分子系有機薄膜太陽電池」日本学術振興会合同研究会情報科学用有機材料第142委員会,東京理科大学森戸記念館,2008年7月.

平本昌宏,「有機半導体高純度化技術の太陽電池への応用」第69回応用物理学会シンポジウム「有機結晶はどこまで進化するか?(有機結晶成長の最新動向と光機能の発現)」,中部大学,2008年9月.

平本昌宏,「低分子系薄膜有機太陽電池の開発」出光興産(株)先進技術研究所,2008年9月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の高効率化,耐久性,将来展望」技術情報協会セミナー「有機薄膜太陽電池の高変換効率化・高耐久化と最適構造制御」ゆうぼうと,五反田,東京,2008年9月.

平本昌宏,「有機ヘテロ太陽電池」第35回アモルファスセミナー「薄膜太陽電池の現状と新展開」京都ガーデンパレス,2008年10月.

平本昌宏,「低分子有機太陽電池の基礎と将来展望」オルガテクノ2008有機ビジネステクニカルセミナー B2有機薄膜太陽電池技術展望,東京ビッグサイト,2008年10月.

M. HIRAMOTO, “Development of organic p-i-n solar cells,” Prof. Ching Tang Lab.seminar, University of Rochester, Chemical Engineering, Rochester (U.S.A.), November 2008.

平本昌宏,「有機太陽電池の最前線」平成20年度日本化学会東北支部講演会「次世代有機エレクトロニクスデバイス・材料の最前線」東北大学青葉記念会館,2008年11月.

平本昌宏,「有機太陽電池における有機半導体の基礎科学——特徴・作動メカニズムと高性能化へのアプローチ——」情報機構セミナー,大田区産業プラザ,東京,2008年11月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池に関する最近の技術動向」(社)電子情報技術産業協会薄膜系太陽電池技術調査分科会セミナー,千代田ファーストビル南館,東京,2008年11月.

平本昌宏,「有機系太陽電池実用化開発の現状」第5回集積光デバイス技術研究会——集積光デバイス技術のコンシューマ展開——,大阪大学銀杏会館,2008年11月.

平本昌宏,「有機薄膜太陽電池の実用化に向けて」第3回「太陽電池実用化技術研究会」名古屋桜華会館,2008年12月.

平本昌宏,「高純度有機半導体を用いた有機薄膜太陽電池」日本画像学会シンポジウム「電子写真相材料の新展開」東京発明会館,東京,2008年12月.

平本昌宏,「有機半導体の超高純度化技術と有機太陽電池への応用」故関一彦先生追悼シンポジウム「有機エレクトロニクス関連薄膜・界面の電子構造と電子過程」名古屋大学野依記念学術交流館, 2008年 12月.

平本昌宏,「有機材料の純度と精製方法,物性への影響」大阪大学有機エレクトロニクス研究会 Winter School「有機エレクトロニクスにおける物性値の意味と評価法」神戸しあわせの村, 2008年 12月.

平本昌宏,「有機半導体高純度化技術の有機太陽電池への応用」放射光/表面電子顕微鏡とナノ精密材料科学シンポジウム(第4回放射光表面科学部会シンポジウム)北海道大学, 2008年 12月.

B-5) 特許出願

韓国特許出願 10-2008-0022605,“ Organic photoelectric conversion film and photoelectric conversion device having the same,” 平本昌宏, Kim, 2008年.

韓国特許出願 10-2008-0049678,“ Organic photoelectric conversion film, and photoelectric conversion device and image sensor having the same,”平本昌宏, Kim, 2008年.

韓国特許出願 10-2008-0108509,“ Photoelectric conversion film, photoelectric conversion device and color image sensor having the photoelectric conversion film,”平本昌宏, Kim, 2008年.

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).

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).

B-10) 競争的資金

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).

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).

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).

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).

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).

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).

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(2008年).

共同研究(新日本石油)「有機薄膜太陽電池の研究開発」平本昌宏(2008年).

C) 研究活動の課題と展望

2008年4月に分子研に着任したため,本年度は,有機半導体の超高純度化と有機太陽電池への応用のテーマに集中し,有機薄膜太陽電池研究の立ち上げを最優先とした。有機太陽電池については,以下の予定を考えている。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,および,その純度を精確に評価する技術を確立し,多種多様な有機半導体に応用する。近赤外域に吸収を持つ有機半導体に超高純度化技術を応用し,また,3元共蒸着層によって,可視,近赤外域すべてをカバーすることで,短絡光電流(J_{sc})=20-30 mA/cm²を得る。1V程度の大きな開放端電圧(V_{oc})を示す,ドナー/アクセプター有機半導体の組み合わせの系に,超高純度化技術を適用して, J_{sc} を飛躍的に向上させ, V_{oc} が1V程度,かつ, J_{sc} が20 mA/cm²程度のセルを実現する。金属/有機界面をオーミック接合化する技術を確立し,曲線因子(FF)を0.8程度まで増大させる。可視光領域と近赤外領域にそれぞれ感度を持つ2つのセルを積層連結した,波長分割タンデムセルを作製する。

以上の研究とは別に,現在パーコレーションに頼っている共蒸着i層ナノ構造作製を,完全に人工的に自由自在に行うために,ナノインプリントと真空蒸着を融合したナノ構造設計方法を確立し,理想ナノ構造である直立超格子ナノ構造を組み込んだ有機太陽電池の実現を目指す。また,STMを用いた弾道電子放出顕微鏡(BEEM)による,有機/金属界面ナノエネルギー構造の解明を行う。