

平成24年度 実施状況の詳細

研究課題名：低炭素社会に資する有機系太陽電池の開発～複数の産業群の連携による次世代太陽電池技術開発と新産業創成～

中心研究者氏名：瀬川 浩司

研究支援担当機関名：独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

1. 研究計画(実施状況)等

(1) 研究計画の工程表(実施状況)サブテーマ番号	サブテーマ名 (サブテーマリーダー名)	4月～6月	7月～9月	10月～12月	1月～3月
①	高効率・高耐久色素増感太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発 (東京大学 瀬川浩司)	①-1 「新規色素・電解質材料の開発と理論化学を用いた発電原理究明」 ①-2 「理論化学を用いた太陽電池の発電原理究明に関する基礎研究」 ①-3 「超高効率色素増感太陽電池を目指した新規増感色素の探索」 ①-4 「酸化チタンナノ微粒子の高速合成法の開発及び材料機能評価」 ①-5 「低コストプロセスの開発と高性能化のための要素技術開発」 ①-6 「高効率化のための材料・モジュール開発と環境試験」 ①-7 「色素増感太陽電池の用途開拓とそれに必要な要素技術の開発」 ①-8 「TCOレス色素増感太陽電池の材料開発とモジュール構造設計」 ①-9 「低コストプラスチック色素増感太陽電池の研究開発」			
②	高効率・高耐久有機薄膜太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発 (京都大学 伊藤紳三郎)	②-1 「有機薄膜太陽電池の物性解析」 ②-2 「有機薄膜太陽電池の劣化機構の解明と高耐久セル開発の支援」 ②-3 「高効率材料・デバイス化技術開発」 ②-4 「高耐久性材料・モジュールの開発」 ②-5 「高効率・高耐久有機薄膜太陽電池集積構造サブモジュールの開発」			
③	広帯域波長可変ハイブリッド太陽電池 (早稲田大学 西出宏之)	③-1 「新型湿式太陽電池創出のための複合機能をもつレドックスポリマーの開発」 ③-2 「有機無機ハイブリッド接合を用いる固体薄膜太陽電池の開発」 ③-3 「色素増感型太陽電池の高効率化と完全固体化のための研究開発」 ③-4 「増感色素を用いた高効率有機薄膜太陽電池の開発」			
④	計測法の開発と標準化活動の推進 (東京大学 富田孝司)	④-1 「国際電気標準会議 (IEC) 国際標準制定のための活動」 ④-2 「色素増感太陽電池の性能評価方法・耐久性評価方法の開発」 ④-3 「有機薄膜太陽電池の耐久性評価方法の開発」			

## (2)実施状況の説明

### ■概要

本課題は、色素増感太陽電池及び有機薄膜太陽電池について世界トップクラスの実績を有する研究機関を結集し、有機系太陽電池の早期実用化を目指して実施している。

最終目標は、色素増感型太陽電池では、小面積セルで変換効率 15%、サブモジュールで変換効率 10%、屋外耐久性 10 年相当以上を、有機薄膜型太陽電池では、小面積セルで変換効率 12%、サブモジュールで変換効率 8%、屋外耐久性 5 年相当以上を達成することである。併せて、定格値に対する総発電量、変換効率、耐久性、製造メリット等で従来の開発の延長線上にない特徴を有する革新的有機太陽電池を実現するため、色素増感太陽電池のメリットである効率と出力安定性と、有機薄膜太陽電池のメリットである高電圧と固体構造を両立させ、光起電力の向上を図る。

本研究開発により、最終的に、光電変換材料の選択で吸収スペクトルを広域にわたって変えることができる広帯域波長可変ハイブリッド太陽電池の実現を目指す。

以下、平成 24 年度の実施状況の詳細を報告する。

### ■サブテーマ①：高効率・高耐久色素増感太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発(東京大学 瀬川浩司)

#### ・本サブテーマにおいて本年度達成した内容のまとめ

サブテーマ①では、効率向上に資する原理解明・材料開発（①-1～5）、耐久性向上に資する材料開発（①-1）、効率・耐久性・低コスト性を両立する集積構造設計・モジュール試作（①-6～9）に分けて開発を推進している。

効率向上に資する材料開発については、これまでに開発した新規ルテニウム錯体色素 Dye X の分子構造を再度設計し直すことで吸収領域をさらに長波長化させることに成功し、シングルセルで世界最高効率に匹敵する変換効率 11.8%を達成した。また、短波長側を吸収する色素と組み合わせたタンデムセルを開発し、変換効率 12.5%を達成した。効率と耐久性の両立への取り組みについては、劣化の要因となる液体電解質を固体化することが鍵となるが、この際に導電率が下がることで、変換効率が大きく低下することが課題であった。この問題を解決する方法として、昨年度までに電解質を擬固体化するナノクレイ材料を開発した。今年度はナノクレイ材料に改良を加えることで、導電率を向上させることに成功した。これをナノクレイ無添加の場合に 9.15%の太陽電池セルに添加すると、11.0%まで変換効率を高められることが確認できた。今後はモジュールサイズにて同様の効果が確認できるかを検証予定である。モジュール開発では、昨年度までに構造設計を行った結果を基に、Dye X の適用による高効率化や、固体電解質の適用による高耐久化を同時に実現するモジュールの開発に着手した。

## ・実施内容①-1：「新規色素・電解質材料の開発と理論化学を用いた発電原理究明」

色素増感太陽電池分野で開発されている従来の増感色素は、吸収端が太陽光スペクトルの800nm程度に留まっており、長波長光を利用できる近赤外吸収色素の開発が求められてきた。昨年度までの成果として、スピン禁制遷移の利用により広帯域で高い分光感度を示し、有機系太陽電池の中で最も高い短絡電流密度を与える色素 Dye X を開発した。今年度は、さらなる光吸収領域の拡張を狙い、新規色素の開発を進めた。また、太陽電池の効率向上のためには、電流とともに出力電圧の向上も重要である。酸化チタンとヨウ素レドックスを用いる色素増感太陽電池の場合、両者のエネルギーレベル差によって出力電圧が規定されるはずであるが、実際のセルではこれより電圧が低いことが多い。本テーマでは、この出力電圧低下の原因を究明するとともに、その改善による電圧向上を図った。また、ヨウ素レドックスに替わる電解質材料を開発することによる出力電圧向上も目指した。

## ◇長波長光を利用できる新規色素の開発

ポルフィリンは高い吸光係数が特徴的であり、酸化チタン層を薄くすることができるため、製造工程の簡易化につながる。今年度、エチニル連結型ポルフィリントライマーについて、酸化チタンへのアンカーとなるカルボン酸部位の導入位置を種々検討する中で、トライマーの末端メソ位にアンカーを導入したものが比較的良好な挙動を示すことを見出した。これは、ポルフィリン上の分子軌道の分布が末端メソ位で大きくなっていることによるとみられる。この結果、800nm より長波長側の領域での外部量子効率が47%となり、既報のポルフィリン系増感色素の中では最も高くなった。

また、長波長光を利用して発電するためには、エネルギーレベルマッチングを保ちつつ励起エネルギーをできるだけ小さくする必要がある。ルテニウム錯体は光励起後すぐに三重項状態に項間交差するため、三重項励起状態でエネルギーレベルマッチングの要請を満たすようにすると、一重項状態への励起エネルギーは少し大きくならざるを得なかった。そこで、基底状態から直接三重項励起状態に遷移するS-T吸収に着目し、この吸収を光電変換に利用することを検討した。そこで、ターピリジンを配位子とするルテニウム錯体の配位子の一つをホスフィン誘導体とした色素DX1の構造を再設計することで、IPCEの立ち上がりはさらに長波長化し、短絡電流密度も向上することを確認した。

## ◇高電圧化を可能とする新規色素の開発

色素増感太陽電池の効率を低下させる主要因として、酸化チタンと電解液が直接接触することによる電荷再結合が挙げられている。これは、酸化チタン表面に多くのプロトンが存在すると酸化チタン伝導帯準位が低下し、出力電圧が低下することが原因と考えられている。その抑制のためにはアルキル鎖の導入などによる酸化チタン表面の被覆が有効だと考えられることから、高い短絡電流密度が得られたホスフィン配位ルテニウム錯体系色素に改良を加え、高電圧化を目指した。

アルキル鎖長の異なる各種アルコールをジオキサホスホランと反応させて得られたリン配位子を用い、種々のアルキル鎖を有する色素を合成した。これらの色素間では、紫外可視吸収スペクトル、発光スペクトル、発光寿命、酸化還元電位に大きな差は見られなかった。しかし、これらの増感色素を用いた太陽電池セルの I-V 特性を評価したところ、アルキル鎖が長くなるにつれて Voc が 0.50V から 0.55V に増加し、光電変換効率は 7.4% から 8.0% へ向上した。これはアルキル鎖長の伸長により、酸化チタン-ヨウ素電解液間の電荷再結合が抑制されたことに起因することが解明できた。

ターピリジン配位子に 3 つあるカルボキシル基のうち 1 つをエステルとすれば、放出されるプロトンの数を抑制できると期待される。実際にそのような色素を合成して調べたところ、全てがカルボン酸のものと比較して、電流・電圧ともに向上し、1SUN 照射下では Voc 0.56V、Jsc 27.0 mA/cm<sup>2</sup> となった。エステル化したものは吸収も長波長化しているため、ここで Jsc の増加は分光感度の広帯域化に起因すると考えられる。Voc の増加は、期待した通り酸化チタン表面近傍にあるプロトンが減少し、酸化チタン伝導帯準位の低下を抑制できたためだと考えられる。光量を少なくした場合、より高い光電変換効率が得られ、0.36sun で 10.1%、0.16sun で 10.5% が得られた。

#### ◇高電圧化を可能とする新規電解質の開発

従来のヨウ素レドックス材から脱却し、より電圧を高めることができる代替材料として、臭素系レドックス材の開発を検討した。従来の I<sup>-</sup>/I<sup>3-</sup>を主成分とした電解液の酸化電位 +0.23V (v s. SCE) に対して、Br<sup>-</sup>/Br<sup>3-</sup>を主成分として調製した電解液の酸化電位は +0.64V となり、酸化チタン伝導帯との電位差が広がるため、出力電圧の向上が期待できることが示された。

次に実デバイスを想定し、電解液と色素の組み合わせを検討した。色素は各種中心金属をもつ 5-(4-carboxylphenyl)-10, 15, 20-trimesityl porphyrin (CPTMP) 誘導体を用い、臭素レドックスを含む電解液の特性について調べた。その結果、Voc はどの色素でも、臭素電解液の方が高い値を示した。これは臭素とヨウ素のレドックス電位の差に起因している。一方、Jsc は色素ごとに違いが見られた。結果として、臭素電解液を用いて、色素の酸化電位を正側にしていくことで、Voc を高く保ったまま Jsc を向上させることができ、Pd CPTMP においてはヨウ素電解液を上回る変換効率を得た。Pd CPTMP 増感セルで Br<sup>-</sup>の濃度依存性を検討したところ、0.7M で最も高い性能を示し、ヨウ素の最適濃度のものと比較しても高い光電変換特性を示した。電解液に 4-tert-butylpyridine を加えたセルでは、0.94V と高い Voc が得られることが分かった。

#### ◇高耐久化に寄与する材料開発

色素増感太陽電池の中でも高い光電変換効率を示すものには主に液体電解質が用いられており、電解液の蒸発などが耐久性低下の要因となっている。電解質を固体化しつつ、高い光電変換効率を維持する材料の開発を目指した。

電解質を固体化した場合、一般にイオンの拡散が制約されて導電率が低下し、効率が下がるという問題点がある。また酸化チタンと電解質との接触が不十分な場合には効率も耐久性も低下してしまうという懸念があった。長期的には電解質の完全固体化が望ましいが、電解質の擬固体化（ゲル化）は、現在使われている電解液を活用できる点で、有望な解決策の一つとして期待されている。今年度は、アニオン交換性を有する層状粘土鉱物の一種であるハイドロタルサイトに着目し、これを添加した電解質の特性と、その色素増感太陽電池における有用性について検討した。表面電荷密度の違いが太陽電池特性に及ぼす影響を調べるため、種々のハイドロタルサイトの中でも、Mg/Al 組成比を変えた硝酸型ナノクレイを合成した。その結果、ナノクレイ無添加の場合に光電変換効率 9.15%だったものが、Mg/Al=3.0 のナノクレイ添加により効率 9.96%となり、さらに Mg/Al=3.4 のナノクレイを添加した電解液について LiI 濃度を最適化したところ、変換効率 11.0%を得た。このように、電解液へのナノクレイ添加は、電解液をゲル化できるだけでなく、光電変換効率の向上にもつながることが明らかとなった。

・実施内容①-2：「理論化学を用いた太陽電池の発電原理究明に関する基礎研究」

本項目では、ミクロな原理によって動作する様々なタイプの色素増感太陽電池の発電原理にまつわる現象を理論化学計算によって解明し、高効率の太陽電池の設計指針を提供することを目的として実施している。今年度は、中心研究者が開発したルテニウム錯体色素や界面錯体材料 TCNQ のさらなる高効率化指針の確立や、電子正孔再結合による変換効率低下抑制方法に関する研究を行った。

◇ルテニウム錯体色素の高効率化指針

中心研究者が開発したルテニウム錯体のさらなる高効率化指針を得るため、時間依存密度汎関数 (TD-DFT) 法に基づく摂動理論により、アセトニトリル溶液におけるヨウ素レドックスとの反応経路に関する量子化学計算を行った。また、分子の核の振動状態をも考慮した光スペクトル理論を開発し、並行して、発光スペクトルの理論的考察も行った。これらの情報から、太陽電池に用いられる分子などの基礎特性を明らかにし、太陽電池設計への指針を示すこととした。

太陽電池変換効率を決定する最大要因の一つは、ヨウ素酸化還元反応に伴う反応速度、特に、ヨウ素系原子(分子)との会合による色素分子の遷移状態のエネルギーである。遷移状態のエネルギーがヨウ素系との反応前、反応後の準安定状態のエネルギーと相対的に低い程、効率が良いと考えられる。この一連の反応の量子化学計算の結果、効率を高める一つの指針として、色素分子とは安定な結合を生成しないが、色素との効率の良い電子授受を保つような、レドックスと有機色素分子の組み合わせを用いることが必要であると明らかにすることができた。

#### ◇界面錯体材料 TCNQ の高効率化指針

中心研究者が開発した、電子を酸化チタンの伝導帯へ直接励起することができる界面錯体材料 TCNQ のさらなる高効率化指針を得るため、第一原理電子状態計算を行い、吸収スペクトルなどの光物性を調べ、電子注入機構を理論的に明らかにした。

具体的には、酸化チタン表面に吸着した TCNQ 誘導体など電子アクセプター分子を利用した光電変換物質の電子特性・光物性の実験結果を量子化学計算によって再現し、分子吸着構造の理論的予測を行なった。酸化チタン表面は、水酸基に覆われているという実験的な示唆に基づき、水酸基の存在を考慮した新規酸化チタンクラスターモデルを作成した。次に、TCNQ、および、TCNQ の類縁体である、TCNTQ、TCNTTQ、TCNI を吸着させた系に関する高精度計算を行なった。TCNQ を吸着させた系については、これまでの計算結果を再現することを確認した。また、より正確な長距離補正密度汎関数法を用いることにより、TCNQ から酸化チタンへの電荷移動遷移の帰属を確定することに成功した。一方、類縁体である、TCNTQ、TCNTTQ、TCNI の吸着構造は、TCNQ を吸着させた系と類似の吸着構造であることを明らかにすることができた。

#### ◇電子正孔再結合の抑制方法について

色素増感太陽電池全般の課題として、電子正孔再結合による変換効率低下が挙げられる。これまで、増感剤のアルキル鎖長を大きくしてアルキルバリア層を形成し、ヨウ素が酸化チタン表面に近づきにくくすることで、その困難を回避することが実験的に行われている。しかし、逆に、電子注入が遅れてしまうという欠点があった。このジレンマを解消するために、アルキル鎖長による電子正孔再結合速度を理論的に見積もり、変換効率低下機構を詳細に解明し、電子注入速度との兼ね合いを含めた防止策の提案を行った。

#### ・実施内容①-3：「超高効率色素増感太陽電池を目指した新規増感色素の探索」

本項目では、近赤外光も効率よく光電変換できる高性能増感色素を開発するため、増感色素のエネルギー準位をチューニングした色素の構造設計をし、それに基づいて色素を合成し、太陽電池性能を検証。良好な結果が得られた色素材料について、課題内の共同研究先に提供した。

#### ◇超高効率増感色素材料設計

増感色素の高効率化には、光を吸収し励起状態にある増感色素から酸化チタンの伝導帯への電子注入、及び電解液中のヨウ素レドックスから酸化状態の増感色素への電子注入が効率よく起こることが必要である。近赤外光を有効に利用するための増感色素として、ポリピリジン配位子とドナー性の二座配位子を有するルテニウム錯体色素の検討を行ってきた。ドナー性配位子としてフェニル炭素はピリジン環の窒素原子に比べ電子供与性が大きく錯体の基底状態を不安定化することができ、長波長側の光エネルギーの利用が期待できる。しかし、

電極に電子を渡して酸化型となった色素分子を再生するための $\Delta G'$  が十分に大きくないと高い変換効率の実現は困難である。前年度までにフェニルピリミジン誘導体をドナー性二座配位子とするシクロメタル化ルテニウム錯体で、フェニルピリミジンのフェニル基に二個のトリフルオロメチル基を導入し $\Delta G'$  を大きくすることで、ベンチマークである N749 色素に匹敵する光電変換性能を実現した。

今年度はフェニルピリミジン配位子について、置換基の数、位置を工夫することで $\Delta G'$  の最適値についての十分な情報を得るとともに、さらなる高効率化実現を目指して新規色素の開発を行った。開発の結果、フェニルピリミジナト配位子のフェニル基に電子吸引性のトリフルオロメチル基を導入した色素で、基底状態のエネルギー準位が正にシフトして $\Delta G'$  が大きくなり、変換効率 10.7% が得られた。また、開発した色素の課題内共同研究先への提供を開始した。

#### ・実施内容①-4：「酸化チタンナノ微粒子の高速合成法の開発及び材料機能評価」

本項目は、色素増感太陽電池の変換効率や耐久性を最大化するため、色素および電解質に最適な光電極材料を開発する目的で実施した。本年度は、高速合成手法によって酸化チタンナノ微粒子の高度な構造制御を実現すると同時に、それら構造の相違が太陽電池機能に及ぼす影響を評価した。

#### ◇マイクロ波水熱反応による異方性酸化チタンナノ結晶の構造制御と光電極の開発

マイクロ波水熱反応により、チタン酸コロイドを原料とする異方性酸化チタンナノ結晶を合成し、アスペクト比、露出結晶面、表面構造等の緻密な構造制御を目指した。

蒸留により精製したチタン酸コロイドと SDA であるクエン酸とを混合し、種々の条件で得られたロッド型酸化チタンの特徴は以下の通りであった。

- (1) 短軸長一定のまま、長軸方向の選択的結晶成長制御（アスペクト比制御）が可能である。また、双晶面を有する V 型酸化チタンが形成する。
- (2) Zigzag 型のエッジ構造をもち、最安定面である 101 面を優先露出する。
- (3) 短時間の水熱反応にも係わらず、高結晶性である。

#### ◇超臨界水反応場における酸化チタンナノ結晶の構造制御と光電極の開発

チタニウムテトライソプロポキシドに有機ナノ構造制御試薬 (SDA) を添加して得られるチタン錯体水溶液を用い、101 面を優先露出する高結晶性アナターゼ型酸化チタンの高速水熱合成に着目した。前年度の合成スクリーニング結果を基に、平均サイズ 20nm 程度の酸化チタンを高再現に得る合成条件について検討した。

トリエタノールアミンから得られるプリカーサ溶液の pH を調整し、380°C、30MPa の超臨界条件下で水熱合成することで、平均サイズが 20nm 程度で、露出結晶面が異なる酸化チタン微粒子の作り分けに成功した。具体的には、高分解能 TEM 観察から、pH8.9 ではアナター

ゼ型酸化チタンの最安定面である 101 面が優先露出した酸化チタンナノ結晶が形成することを見出した。一方、pH11.5 では、101 面および 103 面の異なる露出結晶面の存在が示唆された。

#### ◇マイクロ波水熱反応で得られる酸化チタンナノ結晶の光電極特性

N719 色素あるいは D149 色素と、ヨウ素電解液とを用いて、合成した酸化チタン微粒子を光電極とするセルを作製し、光電変換効率を高めることができる有望な酸化チタン光電極材料の探索と原理解明を進めた。同じチタン原料からアスペクト比を系統的に制御して得られる酸化チタン試料の各電極膜を用いて色素吸着の定量評価を行った。酸化チタンの比表面積から見積もられる飽和色素吸着量を比較すると、N719、D149 とともに長軸が短い粒子で最も高密度に色素が吸着する傾向が見られた。さらに、この系を電子寿命拡散評価すると、電子拡散係数が高い一方、電子寿命は短いことがわかった。電子拡散に優れているほど、再結合反応がより促進されると考えられる。

#### ◇超臨界水反応場で得られる酸化チタンナノ結晶の光電極特性

101 面を優先露出する酸化チタン SC-1、103 面を含む SC-2 の各電極膜を用いて N719 色素の吸着定量評価を行った。単位面積当たりの色素吸着分子数は、5 配位 Ti イオンの表面露出の割合が高いと考えられる系で高密度に色素吸着することが確認できた。これらの酸化チタン微粒子薄膜を用いて色素増感太陽電池を試作し光電極機能を調べた。N719 色素、ヨウ素電解液を適用したセル（最高性能のセル）での I-V、IPCE 測定から、短絡電流 ( $J_{sc}$ ) は、5 配位 Ti イオンの表面露出の割合が高いと考えられる系のセルが高く、IPCE 値の序列と一致した。101 面を優先露出する酸化チタンの方が、電荷分離効率が高いからと考えられる。

#### ・実施内容①-5：「低コストプロセスの開発と高性能化のための要素技術開発」

色素増感太陽電池の高効率化には、短絡電流、開放電圧 ( $V_{oc}$ )、曲線因子 ( $ff$ ) の向上が必要である。このうち、 $J_{sc}$  は同じ色素でも吸着状態によって大きく変化すると報告されている。色素のチタニアの吸着状態を随時モニターし、その吸着状態と太陽電池特性との相関を調べることは太陽電池性能向上の指針を得るために有効な情報となる。そこで、色素の単分子吸着、色素の会合、会合防止剤の吸着挙動を水晶振動子で測定し、それと  $J_{sc}$  の関係を研究し、高性能を発揮する側鎖構造を提案する。また、開放電圧を高くするため、色素構造とレッドボックス種との相互作用の強さを QCM 法（水晶振動子法）で測定し、 $V_{oc}$  の関係を明らかにし、電荷再結合を抑制できる色素の側鎖構造、会合防止剤構造を提案する。また、色素増感太陽電池の作製プロセスの中でのボトルネックである塗布—焼成プロセスを代替する中温度溶射法の検討を行った。

#### ◇色素吸着挙動と $J_{sc}$ の相関に関する研究と高性能色素の側鎖構造の提案



色素のアルキル置換基の長さ、極性を変化させ、吸着特性、吸着量の変化を QCM で測定し、多環状化合物、ルテニウム錯体などの色素吸着特性と  $J_{sc}$  の相関を調べ、高性能化を可能にする側鎖構造の提案を目指した。さらに、共吸着材と色素のカクテル色素溶液にチタニア基板を浸漬させた時の吸着挙動を検討し、共吸着材の吸着、脱着と太陽電池性能の相関を調べ、高性能化が可能な共吸着材構造を検討した。

ポーラスなチタニア層を用いた場合、ナノポア内での拡散の影響が大きくなり、吸着時間が長くなる傾向が QCM で観測された。この構造は実験的にはルテニウム色素と有機系色素を組み合わせたカクテル色素の組み合わせとして知られている。この系での吸着過程を解析したところ、ルテニウム錯体色素単体よりもカクテル化色素の場合に吸着量が多く、さらに形成された膜が柔らかい膜であることがわかった。このことからルテニウム錯体色素は会合してランダムに基板に強く吸着しているが、カクテル色素はルテニウム錯体色素間に有機系色素がスペーサーとして侵入することにより、色素の総吸着量を増大させているものと推定できた。また色素吸着過程での粘弾性の変化から、ポア内で色素が会合しているかどうか判断できることを初めて見出した。このことから、複数の色素を組み合わせた場合に、ナノポア中の粘弾性の制御で太陽電池性能を向上できる見込みが得られた。

#### ◇高性能色素の側鎖構造の提案

色素のアルキル置換基の長さ、極性を変化させ、Co レドックスと色素分子との相互作用を QCM で相対的に測定した。多環状化合物、ルテニウム錯体色素、スクアリル化合物などの色素と Co 錯体との相互作用の強さと  $V_{oc}$ 、 $J_{sc}$  の相関を調べ、高性能化を可能にする側鎖構造の提案を目指した。コバルト電解液と色素の相互作用を色素が吸着したポーラスチタニアセンサーを用いて測定を試みたが、色素とコバルトレドックスの相互作用を再現性良く測定することができなかった。コバルトレドックスと色素との相互作用は現在の QCM 測定システムでは測定できないほど小さいことがわかった。

#### ◇中温度溶射法を用いた低コストプロセスの開発

低コスト化プロセスを目指し、ポーラスチタニア膜作製を数時間から数分に短縮できるプロセス技術として中温度溶射法を応用した製造技術を開発した。具体的には、作製したポーラス膜の細孔分布、色素吸着量、膜厚、表面粗さ等に着目し、太陽電池性能との相関を調べ、従来の塗布法で作製した太陽電池の特性と比較した。中温度溶射法を用いて作製したバックコンタクト型太陽電池はポーラスチタニア層が適当な表面粗さを有しており、バックコンタクト電極を作製する場合に必須なポーラス孔を別途作製するプロセスが必要でなく、ポーラスなバックコンタクト電極が容易に作製できることがわかった。従来のバックコンタクト太陽電池と比較し、短時間で再現性のある電池が作製可能であることがわかった。本方法は、高価な透明導電膜を用いない太陽電池を短時間で作製できるという観点で有効な方法であることを明らかにできた。

・実施内容①-6：「高効率化のための材料・モジュール開発と環境試験」

中心研究者が開発したルテニウム錯体色素 Dye X を用い、有機系太陽電池の実用化を促進するための低コスト化・高光電変換効率化に資する要素技術の開発を進めた。これまでの研究開発の結果、色素材料の高性能化、特に吸光感度と吸収波長領域の拡大を実現させる色素分子設計、さらには開発した色素に適した電解液の開発を行うことにより、5mm 角セルで  $26\text{mA}/\text{cm}^2$  という既存のシリコン製太陽電池級の電流値を得た。また、効率と寿命の両立を図る観点で、色素材料そのものの耐久性向上と、ヨウ素フリーの有機メディエータを用いた第面積モジュールを試作し、加速試験および実環境での信頼性試験を開始した。

・実施内容①-7：「色素増感太陽電池の用途開拓とそれに必要な要素技術の開発」

本項目は、色素増感太陽電池の実用化を促進するため、多色性という色素増感太陽電池の特徴を活かした用途開拓と、それを支える要素技術開発を進める。本年度は、有機色素系の屋外耐久試験を行い、その劣化要因の解明から色素の分子構造の改良による耐久性向上を目指した。また、得られた色素を用い、イオン性液体電解質を用いたモジュールを多数試作し、耐久性検証を行った。ここで高い耐久データが得られたモジュールを用い、複数の製品モデルを試作し、日本各地域での発電量検証をした。

◇多色化対応色素の研究開発

多色性の特徴を活かした意匠性のある太陽電池を実現するため、これまで耐久性が検証されていなかった種々の有機色素系の屋外耐久性評価を進めた。昨年度の研究の結果、ドナー部分とアクセプター部分を二重結合部位が劣化に影響している状況が推察されたため、今年度液体クロマト質量分析を行ったところ、二重結合部での酸化反応により、色素が変質して太陽電池の耐久性が低下する劣化機構であることがわかった。有機色素の耐久性を向上させるため、ドナーは同じインドリン骨格であり、従来のアンカー基（シアノ-カルボン酸）とは異なる新規なアンカー基を有する色素を合成した。従来のインドリン系シアノ-カルボン酸(D131)に比べて、新規アンカー基を有する色素では、 $85^\circ\text{C}$ 1100 時間放置試験での効率保持率が高く、耐久性向上が確認できた。

また、効率と耐久性を両立する多色化色素と電解質の組み合わせを検討したところ、スクワリリム系色素など電荷を帯びた色素では、電解液添加剤にイオンを含む物質は適していないことが、ポルフィリン系色素ではイオン液体電解質にグアニジンチオシアネートを添加することで耐久性を維持しつつ効率を 1.1 倍にできることが分かった。

◇多色化モジュール開発と実環境試験

昨年度までの開発で、部品点数や生産性に優れたモノリス型モジュールを選定し、設計に加え、それに必要な対極となる触媒性を有するカーボン材料や製造プロセスを開発してきた。

特に課題の大きかった印刷工程や焼成雰囲気を設備や工程を改善する事により、試作時のバラつきを抑えることができた。今年度は、耐久性に優れた Z907 色素とイオン性液体電解質を用いたモジュールを用い、製造時の条件と耐久性の関係を調査した。初めに、試作したモジュールの耐久性を評価したところ、耐久性が悪くなったモジュールでは、炭酸ガスレーザーでスクライブした箇所が均一でなく、イオン性液体が外部に漏れだし、これが耐久性に影響したことが分かってきた。次に、加速耐久試験機で JIS8912/8933/8942 試験法に準拠し、光照射強度  $1000\text{W}/\text{m}^2 \pm 5\%$ 、モジュール作動温度  $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  で耐久性試験を行ったところ、イオン性液体を電解液に用いたモノリス型モジュールの光作動耐久性は、200 サイクルまでの試験では、すべての試作品で初期性能の 90%以上が得られており、十分な耐久性があると判定できた。

次に、このモジュールを用い、独立電計としての利用が想定される店舗の看板や公共施設の案内板、バス停をイメージした自発光看板（正面と背面に  $75^\circ$  の角度でモジュール 4 枚を取り付け）を試作し、北海道苫小牧と愛知県衣浦に設置し、実環境評価を行った。その結果、裏面では建造物等の反射光でも十分な発電をし、また、低温・高温による性能低下もほとんど見られなかった。今後さらにユーザー評価を得られる試作品の開発・実証を行っていく。

#### ・実施内容①-8：「TCO レス色素増感太陽電池の材料開発とモジュール構造設計」

現在、色素増感太陽電池には透明電極膜付きガラス（TCO ガラス）が用いられているが、材料費が高価であり、低コスト化には、TCO ガラスを使わないモジュールの実現が必要である。昨年度は TCO ガラスを使わないセルを開発し、TCO ガラスを使用する従来構造と同等な構成材料を使用して、従来構造以上の性能引き出しの実現性について検証した。今年度はセルを集積化した TCO レス色素増感太陽電池セルを開発し、TCO ガラスを使用する従来構造と同等の性能を得ることを目指した。

TCO レスにすることで、各セルを接続する接続層が必要となり、このままでは集積モジュールの構造が複雑になってしまう。そこで、対極を形成することで隣り合うセルを接続するモノリシック構造を考案し、試作検討をした。まず、モノリシック構造の単セルを試作するため、酸化チタンと集電電極を形成した後、絶縁層を形成し、その上部に対極を形成した。このセルの特性を評価したところ、短絡電流値 ( $J_{sc}$ ) が想定よりも低下することが判明した。その原因を解析したところ、色素吸着量の大幅な低下、焼成による集電電極の抵抗値が増大することが分かった。そこで、集電電極の最適化を図るため、種々の方法を検証したところ、集電電極の膜厚を厚くすることで内部抵抗を減らし、電流値を増大させることができた。しかしながら、内部抵抗による電流値の低下率がなお 30%程度あると試算されることから、引き続き  $J_{sc}$  の改善を進める。

#### ・実施内容①-9：「低コストプラスチック色素増感太陽電池の研究開発」

色素増感太陽電池で多く用いられているガラス基板は、コスト試算で構成部材費の多くを

占めている。これをより安価なプラスチック基板に変えることより、一層の低コスト化が図れる。しかしプラスチック基板は、耐熱性が低く、酸化チタンの高温焼成ができないため、従来の材料、プロセスでは特性向上が見込めない。そこで、半導体層の成膜プロセス及びそれに適した材料の研究開発を行う。また、現在、太陽電池の必須構成部材である IT0 等の透明電極もコスト削減の阻害要因であり、IT0 を必要としないモジュールを設計した。

#### ◇劣化メカニズムの解明と信頼性向上

プラスチック基板を用いた場合、基板の耐熱温度が約 150°C であることから、酸化チタン層の処理が難しくなることによる信頼性低下が課題である。これまで試作したモジュールの劣化解析をしたところ、電解液への色素の溶解や、酸化チタン層の亀裂発生が生じていた。

色素の溶解を抑制するため、種々の色素を用い溶解性を検証した結果、電解液に使用される比較的高極性に溶解しにくい非極性型分子を持つ色素が、相対的に溶解度が低いことが判明し、この結果から、モノカルボン酸色素である MK-2 色素が最も適当な色素であることが特定できた。

また、非焼成用の酸化チタンペーストを用いた場合、ペースト中の樹脂量を限界まで軽減しているため、樹脂による酸化チタン粒子同士の密着性が低下しており、結果として酸化チタン膜の IT0 表面への密着性が低下するものと判明した。この状態で電解液が注液されると、電解液が酸化チタン粒子の間隙に浸入し、酸化チタン粒子同士を束縛している樹脂および酸化チタン粒子と IT0 表面を束縛している樹脂に対して膨潤を起こす。膨潤によって樹脂の密着性は著しく低下するため、前者については酸化チタン粒子同士の束縛が解かれてクラックとなり、剥離に至ったと推定できる。そこで、樹脂以外の添加剤を利用して酸化チタン膜の密着力向上を図る手法を検討した。添加物としては、色素吸着を阻害しないものから選定する必要があるため、安定な構造としたチタンアルコキシド化合物を選定し、亀裂発生の有無を検証した。その結果、チタンアルコキシド化合物を用い、かつ膜厚を厚くすることにより、従来のペーストよりも亀裂の発生の抑制にも発電効率向上にも寄与することが分かった。

#### ◇光ディスク型モジュールの開発

軽量で、可搬性に優れ、取付け交換が容易な太陽電池として、光ディスクの様なドーナツ型の孔の部分に機械的な固定と電気的な接続の機能を持たせた、光ディスク型セルを開発した。透明電極/TiO<sub>2</sub> 多孔質膜に接続される負極側電極端子と、触媒に接続される正極側電極端子が同一方向（ここでは受光面とは反対側）にあり、それらが同心円状にオフセットされた位置に配した。負極側（上側）の基板は、光メディアと同じ径の孔(15mmφ)があり、正極側（下側）はそれより大きな孔(25mmφ)を持つ。正極側電極は、通常、透明電極と対向した位置（正極側基板の上側）形成されているが、孔の側壁にも金属電極を形成し、正極側基板の表裏（上下）面を電気的に接続させている。このセルを試作したところ、1枚のセルで電流値は数百 mA、解法電圧は 0.5V 程度であった。大面積の単セルであるために、電流値がある程度大きくなるとセルの内部抵抗が大きくなり影響して、電流の取り出し効率が低下してい

るため、各セルの面積および電極間距離が同一となるケーキカットタイプの4分割セルを改めて試作したところ、開放電圧が1.98Vとなり、良好な結果を得ることができた。

■サブテーマ②：高効率・高耐久有機薄膜太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発（京都大学 伊藤紳三郎）

・本サブテーマにおいて本年度達成した内容のまとめ

サブテーマ②では、効率向上に資する原理解明・材料開発（②-1、3）、耐久性向上に資する原理解明・材料開発（②-2）、効率・耐久性・低コスト性を両立する集積構造設計・モジュール試作（②-4、5）に分けて開発を推進している。

昨年度までに得られた有機半導体内部でのエネルギー変換素過程の解析結果を基に、ドナー材料の開発とセル作製条件の最適化を進め、その結果、世界最高効率に匹敵するセル変換効率10.6%を達成した。モジュール開発では、集積構造の最適化と周辺部材の耐久性向上により、加速試験条件下で、屋外設置10年相当で性能保持率80%以上のサブモジュールを実現した。また、これらの結果を受け、高効率が得られた有機半導体材料を高耐久性モジュールに適用し、効率と耐久性を両立するモジュールの開発に着手した。

・実施内容②-1：「有機薄膜太陽電池の物性解析」

有機薄膜太陽電池の高効率化の実現を目的とし、前年度までに確立した高感度過渡吸収分光測定を中心とする分光技術を駆使することで、励起子生成から電荷回収に至る光電変換機構の全容を明らかにし、光物理素過程の観点から要因究明を行った。企業等から提供される新規材料も含めて素子の物性解析を行い、サブテーマ②グループ全体として、科学的基盤に基づく高性能高分子材料の合成開発、高効率・高耐久有機薄膜太陽電池開発の加速に貢献した。

◇フルオレン共重合体/フラーレン太陽電池（東レ提供試料）

フルオレン共重合体(N-P7)を用いた薄膜太陽電池素子を作製し、光電変換素過程の各効率をRR-P3HT/PCBM系と比較するとともに、活性層の膜厚効果を調べた。過渡吸収測定およびスペクトル分割解析の結果、励起子は時定数0.3ピコ秒で減衰した。一方、電荷種はパルス内に全体の80%程度が既に生成しており、残りの20%は時定数0.3ピコ秒で生成することが分かった。両者の時定数が一致し、かつN-P7の蛍光寿命より大幅に短いことから、励起子は効率的に電荷分離状態へと変換されることが分かった。素子の外部量子収率を全ての素過程の効率を用いて定量的に説明することができることが分かった。

◇結晶性共役高分子/ICBA太陽電池（JX提供試料）

これまでの研究からフラーレン誘導体のPCBMとICBAを比較するとICBAを用いた素子の方が耐久性に優れていることが判明している。そこで、新規材料である高分子JX-PとPCBMおよびICBAのブレンド系について分光測定を行い、光電変換過程を検討した。その結果、

JX-P/ICBA ブレンド系ではサブナノ秒領域において電荷再結合過程が存在し、再結合の結果 JX-P 三重項励起子が生成することが明らかになった。このことは ICBA の浅い LUMO 準位によって JX-P/ICBA 系では電荷分離状態のエネルギーが高く、JX-P 三重項準位を上回るためであることが分かった。このように高耐久性の ICBA を用いる際には組み合わせる高分子材料の三重項準位を考慮した設計が求められることが示された。

#### ◇ 高分子/高分子ブレンド太陽電池（住友化学提供試料）

光捕集能に乏しいフラーレンに替わる電子輸送性共役高分子を利用した高分子/高分子 BHJ 素子の開発と高効率化を行うとともに、過渡吸収分光法を中心とする分光測定により、光電変換の律速過程解明に取り組んだ。フルオレン共重合体 (PF12TBT) を電子輸送材料として利用し、正孔輸送材料に poly(3-hexylthiophene) (P3HT) を用いることで全高分子型 BHJ 素子を作製した。PF12TBT の高分子量化により、前年度は 2% に留まっていた変換効率を 2.7% まで向上させることに成功した。また、分子量の更なる最適化を検討した結果、素子の外部量子収率は 25% から 40% に向上し、全高分子型 BHJ 素子では世界トップレベルの値となった。

次に、全高分子型 BHJ 素子の特性を支配する要因を解明するため、蛍光・過渡吸収分光測定により光電変換素過程の解明を行った。その結果、P3HT/PF12TBT ブレンド薄膜においては、熱アニールにより相分離が進行することで励起子の電荷分離界面到達効率が低下する一方、ドメイン純度の向上によってドメイン内での励起子失活が抑制され、自由電荷生成効率が向上することを明らかにした。これらの知見より、外部量子効率の向上には、(1) D/A 相分離成長を励起子拡散長程度に抑え高効率界面電荷分離を達成する、(2) ドメイン組成を制御し純度を向上させることで、自由電荷生成効率を向上する、以上が重要であることを明らかにした。

#### ・実施内容②-2：「有機薄膜太陽電池の劣化機構の解明と高耐久セル開発の支援」

有機薄膜太陽電池の実用化に資するため、高耐久化技術を確立することを目的として、太陽電池特性の劣化機構の解明を行った。

PCDTBT/PCBM を発電層としたセルは、P3HT/PCBM から構成されたセルと比較して高効率である上に、熱耐久性が高いことが知られている。耐熱性を決定する要因および熱処理による構造最適化の指針を見出すことを目的とし、熱処理に伴う相分離ドメイン構造の変化を微小角入射 X 線小角散乱 (GISAX) 測定により解析し、光電変換特性の関係性を評価した。熱処理による膜内相分離構造の評価を放射光施設 Spring-8 内の BL46XU において、GISAX 測定を行った。得られた小角散乱曲線から混合膜の相関長を見積もったところ、熱処理温度の上昇に伴い相分離ドメインのサイズが増大した。一方、PCBM の 2 付加体である bis-PCBM と PCDTBT を混合した系では、熱処理による小角散乱曲線の変化は見られず、ドメインサイズの増大は認められなかった。PCBM と bis-PCBM の拡散能・凝集能の違いにより相分離構造の熱安定性が大きく異なることが分かった。

## ・実施内容②-3：「高効率材料・デバイス化技術開発」

有機薄膜太陽電池の発電層を構成する基本材料である有機半導体材料について、ドナーポリマーを中心に開発を行った。今年度は10%以上の高変換効率を得るため、昨年度に引き続いて当社第一世代ドナーポリマーN-P7の主鎖構造を起点として主鎖構造と側鎖構造を検討し、種々の新規ドナーポリマーを合成した。

初期に合成した新規ドナーポリマーの中から、有機薄膜太陽電池用ドナー材料として最適なバンドギャップ ( $E_g=1.58\text{eV}$ ) と高い吸光係数、高いFETホール移動度を有する系を選定し、高効率化のための分子設計改良を行った。その結果、ffの非常によいドナーポリマーを合成することに成功し、これにやや厚めの光吸収層と陰極バッファ層の最適化を行うことで、シングルセルとしては世界最高レベルの変換効率10.6%を得ることに成功した。今後、開発したドナー材料を共同研究先に提供し、効率と耐久性を両立するモジュールを試作する予定である。

## ・実施内容②-4：「高耐久性材料・モジュールの開発」

有機薄膜太陽電池の高耐久性材料・モジュール開発のため、屋外暴露劣化モードに対応した加速試験条件を確立し、加速係数の特定と劣化機構を解明による耐久性指針を明確にした上、5年以上の寿命を持つ高耐久性材料・モジュールを開発する目的で実施した。

## ◇屋外暴露劣化モードに対応した加速試験条件

これまでの検討で、独自材料を用いたOPV素子が耐光性試験1000時間(約1.5ヶ月)で屋外暴露試験の10000時間(約1年間分)の結果と相関があることを確認した。そこで、この寿命予測手法の汎用性を確認するため、市販材料であるP3HT、PTB7および弊社独自の新規高効率ポリマー材料A、Bを用いて屋外暴露試験、連続光照射試験、耐熱性試験、耐湿性試験を開始した。

現在までに500時間程度の検証を行ったが、P3HT、PTB7ではほぼ同様の劣化挙動が見られており、概ね10倍の加速係数が適用できると判断できる。しかしながら、ポリマーBでは屋外暴露での劣化経過時間が不十分で、加速係数の適用が可能か十分な判定ができなかったため、さらに試験を継続することとした。今後は検討する材料を増やし、各材料に最適な加速試験条件の妥当性を確認し、加速係数を見積もる。

また、素子構造を改良し、ゲッター材を導入ことにより、水分の浸入を遮断する検討を行ったところ、従来劣化挙動が異なり比較試験ができなかった耐熱性試験、耐湿性試験でも安定した劣化挙動が確認された。

## ◇高耐久性材料・モジュールの開発

これまでの検討で、金属電極の最適化や、UVカットフィルター、ゲッター材といった周辺部材の改良により高耐久化がなされ、連続光照射では2000時間まで効率保持率80%が維持された。しかしながら、耐熱性試験(85°C、暗所、JIS8938 B-1準拠)では劣化が大きく、数

百時間で効率がほぼ 0%まで低下する。そこで、耐熱性試験における劣化機構の解析とそれを踏まえた周辺部材の改良を行った。

劣化試験前後の紫外可視吸収スペクトルでは活性層の劣化は見られないことから、熱による劣化は活性層以外の劣化によるものと考えられる。加えて、熱による劣化は陽極側の劣化が支配的であることが検討から明らかになっている。金属電極自体が熱によって劣化することは考えにくいことから、活性層と電極との間に挿入するバッファ層が劣化の要因であると推測した。そこで、耐熱性に優れると考えられる無機酸化物バッファ層を用いて検討を行ったところ、耐熱性が大幅に改善し、連続光照射 1000 時間でも効率低下がほとんど見られなくなった。これは屋外耐久性 1 年相当の成果であり、次年度も引き続き検証を続ける。

・実施内容②-5：「高効率・高耐久有機薄膜太陽電池集積構造サブモジュールの開発」

有機薄膜太陽電池の耐久性向上および集積構造サブモジュールの変換効率向上を目的として、以下の開発に取り組み、最終的に、小型素子の 7 割以上の変換効率の集積構造サブモジュールで 10 年相当の耐久性を有する有機薄膜太陽電池を開発する目的で実施した。

◇素子の耐久性の向上検討

新たに開発した電極材料を適用した P3HT 系高耐久ガラス素子の耐光試験を昨年度より継続して実施した結果、小型素子、集積構造モジュールともに試験時間 1 万時間を超えても性能低下は 10%程度であることが確認された。小型素子では試験開始後 60h で 7%程度の性能低下が起こるものの、その後の性能低下は 4%程度でほぼ横ばい傾向であることも分かった。さらに集積構造モジュールに関しては屋外暴露試験も 1 年を経過し、加速耐光試験との劣化挙動の相関を解析した結果、加速耐光試験 1000~1500h が屋外暴露 1 年に相当することが想定され、現状の P3HT 系素子は 7~10 年相当の耐久性が期待できることが分かった。

また、耐光試験での初期劣化挙動の解析のため、加速耐光試験時の照射光強度、雰囲気温度の初期劣化挙動への影響検証を実施した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 雰囲気温度が高くなるほど、初期の性能低下速度は速くなる傾向があり、最終的な性能低下量は、雰囲気温度によらずほぼ一定であることが分かった。
- (2) 照射光強度が強くなると初期の性能低下速度は速くなる傾向が確認され、最終的な性能低下量は、照射光強度によらずほぼ一定であることが分かった。

以上のことから、初期劣化は残存酸素など微量不純物との反応が関与しており、微量不純物がほぼなくなった時点で性能低下が止まると推定される。

次にローバンドギャップポリマー材料系での耐久性改善検討を行った。P3HT 以外のポリマー材料として、高効率化が期待できるローバンドギャップポリマー材料を用いて、各種耐久試験（1SUN 連続照射耐光試験、85℃耐熱試験）を実施した。その結果、特に耐熱性が P3HT に比べ悪化する傾向が見られた。ポリマーにより使用するフラーレン誘導体やホール輸送材料（HTL 材料）が違っているため、耐熱性に対するそれらの影響に関して検討を実施した。その結果、P3HT でも PCBM と組み合わせると耐熱性が低下する傾向が見られ、耐熱性の低下



は主に PCBM の凝集が原因と想定された。ただし、ポリマーは ICBA との組合せでは非常に発電効率が低いため、各種フラーレン誘導体との組合せを検討し、初期性能はほぼ同等となるものに関して、耐熱性への影響を検証した。その結果、組み合わせるフラーレン誘導体を変えることで耐熱性が向上することが確認できた。

#### ◇集積構造サブモジュールの変換効率向上検討

ガラス基板型サブモジュールの効率向上を目指し、レーザーパターニング装置を用いて、各層のパターニング加工工程の条件最適化を実施した。その結果、40 $\mu$ m 線幅で加工できるようになり、面積効率を 98.1%まで向上させることができ、開口部面積基準で変換効率 4.2%の集積構造サブモジュールを作製することができた。これにより目標の小型素子の 70%の性能を上回る 84%の性能の集積構造サブモジュールを作製する手法を確立することができた。

次にフィルム基板型サブモジュールの効率向上を目指し、作製条件検討を実施したが、ITO、発電層、金属電極層各層のスクライブ加工において、ガラス基板と同じ条件では下地層へのダメージが大きくなることが確認できた。そこで、スクライブ条件の再検討を実施した結果、下地層へのダメージを最小にし、隣接するセル間の絶縁を確保できる条件を確立し、変換効率 2.8%程度の集積構造サブモジュールを作製することができた。ただし、変換効率のばらつきがガラス基板に比べ大きい傾向があったため、EL 発光分析等を活用し、ばらつき要因の解析を行った。その結果、EL リーク発光欠陥の数と素子性能は良い相関があり、リーク欠陥数が同等であれば、ほぼガラス素子同等の性能のフィルム素子が作製できることを確認した。また、典型的な EL リーク発光欠陥の断面分析を行った結果、主な要因として、異物の混入、金属電極のレーザースクライブ時のダメージ、電子輸送層 (ETL) の凹凸、の 3 つがあることが分かった。本解析結果を基に次年度以降はさらなる改良を行う予定である。

#### ■サブテーマ③：

色素増感太陽電池・有機薄膜太陽電池をハイブリッドした革新的太陽電池創出のための基盤研究（早稲田大学 西出宏之）

##### ・本サブテーマにおいて本年度達成した内容のまとめ

サブテーマ③では、色素増感太陽電池のメリットである効率と出力安定性と、有機薄膜太陽電池のメリットである高電圧と固体構造を両立させ、変換効率、耐久性、製造メリット等で従来の開発の延長線上にない特徴を有する革新的ハイブリッド型太陽電池の開発を進めている。変換効率、耐久性、製造メリット等で従来の開発の延長線上にない特徴を有するセルやモジュール設計指針を明らかにすると共に、それに必要な材料を開発する。そのために、耐久性向上に資するレドックス材料開発（③-1）や固体電解質開発（③-3）、効率向上に資する素子設計（③-2、4）に分けて開発を推進している。

今年度の主な成果として、ホール輸送材にスピロビフルオレン化合物を用いた系で高電圧が得られることを発見。さらに、可視光を全波長に渡って吸収する無機化合物半導体（ペロ

ブスカイト結晶ナノ粒子)を開発することで、固体型有機太陽電池としては世界最高効率の10.9%を得た。

・実施内容③-1:「新型湿式太陽電池創出のための複合機能をもつレドックスポリマーの開発」

レドックスポリマーに増感色素分子を組み込んだハイブリッド系を対象として、光誘起電子移動とそれにもなう輸送現象の全容解明により、色素増感太陽電池の多様化に将来必須となる革新的な電荷分離・輸送・貯蔵ポリマーを創出することを目的としている。電気化学的に可逆な酸化還元を示すニトロキシドラジカル誘導体において、色素への電子注入が効率よく生起し、速い自己電子交換反応や物質拡散に基づく効率的な電荷輸送が可能となることを実証するとともに、酸化還元電位の制御により高い光起電力を発生することを明らかにすることを目指した。

◇ニトロキシドラジカルメディエータへの長波長吸収色素の適用

前年度までに、ニトロキシドラジカルメディエータを用いた色素増感太陽電池セルにおいて、可視光吸収帯を互いに補完し合う二種のインドリン色素を用いることで約9%の発電特性を得ている。今年度はこれまで適用しているインドリン色素(D205)と比してさらに長波長吸収可能なインドリン誘導体(SD-21:リコー提供サンプル)を用い、ニトロキシドラジカル色素増感太陽電池の高特性化を検討した。

SD-21の適用により700 nmのIPCEが向上し、変換効率8.0%が得られた。ただし、 $J_{sc}$ は向上したものの、 $V_{oc}$ の低下が見られた。吸着色素量の低下および逆電子移動抵抗が低下していたことから、色素がより粗に吸着し逆電子移動が増大したためと考えられる。今後、逆電子移動抑制のための電解液添加物および色素供吸着剤の検討により特性向上を試みる。また、吸光係数高くかつ赤外領域に吸収をもつ色素の適用も試みる。

◇擬固体電解質としてのレドックスポリマーの開発

前年度までに開発している、ニトロキシドラジカルメディエータ(TEMPO)を用いた色素増感太陽電池において、有機ゲル化剤を用いた擬固体型色素増感太陽電池を作成した。TEMPOのアセトニトリルおよびより高沸点なメトキシプロピオニトリル電解液に有機ゲル化剤を添加、電解液をゲル化した。ゲル電解質中のTEMPOの拡散係数は $10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/sであり、色素増感太陽電池におけるメディエータとして適用可能な値が得られた。

ゲル電解液を用いて作成した色素増感太陽電池の発電特性は溶液と比較して、全パラメータにおいて顕著な低下無く、変換効率は同等であった。ゲル電解質においてもTEMPOの拡散が十分早いため特性低下無く素子が得られたと考察している。

・実施内容③-2:「有機無機ハイブリッド接合を用いる固体薄膜太陽電池の開発」

色素増感太陽電池・有機薄膜太陽電池双方の特徴を併せ持つ革新的太陽光発電デバイスを

開発する。色素増感太陽電池のメリットである光量に対する安定した電圧と、有機太陽電池のメリットである高い電圧ならびに液体を含まない固体構造を両立させたデバイスの基礎を設計し、これによって、高性能と耐久性を両立させるとともに、セル構造を基本的に溶液塗布・印刷によって安価に形成できる太陽電池開発を目指した。

#### ◇高電圧、ワイドラチチュードの有機無機ハイブリッド太陽電池の創製

有機系太陽電池は従来の無機太陽電池に比べてセル電圧が高いことが特徴であり、昨年度までの成果では、0.95Vの電圧が得られている。今年度は、1.2Vまでの高電圧出力を実現するセル設計を進め、また、性能上の特長として低光量(照度)から高光量(照度)までの広い光環境で出力が安定な特徴(ワイドラチチュード特性)を引き出せるセル構造を設計した。

セルの基本構造を、酸化チタン、有機もしくは無機の感光材料、有機正孔輸送剤の3者の接合という有機無機ハイブリッド構造とすることを検討した。酸化チタンはナノ粒子集合体として1 $\mu$ m以下の厚さの薄膜を塗布により透明導電基板上に被覆し、これに吸光係数の高い感光材料(有機もしくは無機)を化学的に表面結合させ、正孔輸送層を介して最上層には金属薄膜をオーミック接合した。ここで、感光材料には、吸光係数の高い有機顔料であるアントラキノン(AQ)を有機配位子としてTiO<sub>2</sub>表面のチタンに配位結合させた電荷移動型有機金属錯体を用いた。有機正孔輸送材にはペリレンを用いて、固体薄膜型の太陽電池を作製した結果、このAQ-Ti電荷移動錯体とペリレンの接合によって、光電変換において1.18Vの高い開回路電圧を出力できることを見出した。太陽電池セルのフィルファクター(ff)が低いことからエネルギー変換効率が2%以下にとどまっているが、今後、内部抵抗を改善することで高い効率が期待できる。

#### ◇塗布型有機無機ハイブリッド太陽電池の高効率化

有機無機複合化合物であるアルキルアンモニウム金属ハライドのペロブスカイト構造を持つ結晶が、溶液塗布によって形成され、可視光応答型の半導体である酸化チタンへ効率よく電子注入する性質に着眼して、これを用いた有機無機ハイブリッド固体太陽電池の設計を行った。

感光材料のペロブスカイト結晶層をスピコートによって厚さ1 $\mu$ m以下のTiO<sub>2</sub>多孔膜に被覆し、上層に有機正孔輸送材のビフルオレン系化合物SpiroOMeTADを同じくスピコートによって積層し、金属対極を被覆して作製したセルは、1V以上の電圧を出力した。この構造に、さらにペロブスカイトを担持するscaffoldとして絶縁体のアルミナ多孔膜を用いた結果、セルの変換効率はTiO<sub>2</sub>膜の単独を用いる場合を上回り、固体ハイブリッド太陽電池として最高値である10.9%が得られた。従来の増感とは異なるメカニズムで感光層が光励起電荷輸送にはたらくことが示され、アルミナ多孔膜上のペロブスカイト膜が強い発光を示すことが同時に見出されたことから、励起状態の電子寿命が長いペロブスカイト化合物の特徴が、高効率の発電につながったと考える。また、本研究では、逆電子移動の抑制に有効な緻密なブロッキングバッファ層の作製も高効率化の重要な要素であることが明らかとなっ

た。本研究成果は、Science 誌に掲載し、現在も世界的に活発に追試が行われていることから有機無機ハイブリッド化技術として大きなインパクトを与えたと考える。

・実施内容③-3：「色素増感型太陽電池の高効率化と完全固体化のための研究開発」

色素増感太陽電池の高効率化のアプローチの一つとして、増感材を吸着させるのではなく、光電極に直接共有結合させる手法がある。共有結合可能な材料として、中心研究者が開発したジシアノメチレン化合物 (TCNQ) があるが、まだ十分な変換効率が得られていないことから、TCNQ を用いた太陽電池セルの高効率化を目指した。また、耐久性を向上させるための完全固体電解質の実現を目指した。

◇直接励起型長波長吸収増感色素の開発

TCNQ 誘導体を吸着する際に超臨界 CO<sub>2</sub> 流体を適用する検討を試みた。超臨界 CO<sub>2</sub> 流体下で、TCNQ と TiO<sub>2</sub> が界面電荷移動錯体を形成するかを IR スペクトルにて確認した。その結果、超臨界 CO<sub>2</sub> 流体下においても、TCNQ と TiO<sub>2</sub> が界面電荷移動錯体を形成すること、圧力や温度条件で吸着状態が変化することが明らかとなった。

例えば、圧力を 20MPa から 30MPa へ増加すると約 600nm 付近が若干増加した。40MPa まで増加すると 450nm と 600nm の IPCE 値はほぼ同じ程度まで増加した。これは、共吸着剤を併用したときの振る舞いに類似しており、圧力を高めることで系内の CO<sub>2</sub> 濃度が高くなり、TCNQ 間に存在する CO<sub>2</sub> が増えることで、TiO<sub>2</sub> 上での TCNQ 間の相互作用が減少したためと推測している。また、温度を変化させた際も IPCE 波形の変化が大きく、50℃での吸着温度を 90℃まで増加すると、波形全体が長波長シフトする現象が確認された。110℃まで増加すると IPCE の値が減少してしまうが、50℃に比較すると長波長シフトしていることが分かった。

通常の溶液吸着と超臨界 CO<sub>2</sub> 流体下 (条件：50℃、20MPa、20 分) での吸着を比較した結果、溶液吸着は TCNQ 濃度を 3mM、超臨界吸着も 3mM で吸着すると、特性はほぼ同じ結果を示したが、TCNQ 溶液を飽和濃度にして超臨界流体下で吸着させると特性が向上する結果を得た。次年度以降、この結果を用いたさらなる高効率化を進める予定である。

◇固体電解質の開発

固体電解質として、有機薄膜太陽電池にも用いられる有機半導体の適用を試みた。しかしながら、従来の有機半導体は、内部抵抗が高いため、ホール輸送距離には限界があり、光を十分に吸収できるほど酸化チタン多孔質膜厚を増加することが困難である。そこで、固体型色素増感太陽電池のホール輸送材料にコバルト錯体を混合する検討を行った。

その結果、コバルト錯体の比率を増加するにつれて開放電圧は増加するものの、短絡電流密度が大きく減少し、結果として変換効率は大きく減少することが分かった。どちらかがトラップになってしまい、ホールの輸送が円滑に行われなくなったためと推測している。また、ホール輸送材料を、超臨界 CO<sub>2</sub> 流体を用いて製膜したところ、変換効率 4.2% が得られた。今後は、超臨界プロセスに適したホール輸送材料を見出し、高効率化を目指す。

次に、ホール輸送材料を使用せず、コバルト錯体単独で固体化する検討を行った。その結果、セル変換効率は 3.06%程度であったが、 $R_s$  が 82.7 $\Omega$ と、これまでに検討してきた有機半導体に比較して非常に小さいことがわかった。しかしながら、今回用いた材料は非常に結晶性が高く、再現性に乏しかった。今後は早稲田大学西出研究室と共同で固体化に適したコバルト錯体材料開発を行っていく。

・実施内容③-4：「増感色素を用いた高効率有機薄膜太陽電池の開発」

近赤外増感色素の導入により光捕集帯域を拡大することによる高効率化を目指し、増感色素を用いた有機薄膜太陽電池と有機・無機ハイブリッド太陽電池の開発と、色素を用いることによる効率向上効果を検証した。

◇増感色素を用いた有機薄膜太陽電池

有機薄膜太陽電池において色素による増感を効果的に実現するには、色素を高濃度に界面に偏析させることが必要であると昨年度までに判明した。色素が成膜中に自然に界面偏在するよう新規色素の設計・開発を行った。はじめに、フタロシアニン平面環に種々の軸配位子を導入した近赤外色素 SiPc を合成した。スピンコート法により各 SiPc の薄膜（約 100 nm）を作製し、接触角測定から表面エネルギーを評価した。その結果、SiPcB6 は P3HT ドメインに、SiPc は P3HT/PS 界面に、SiPcBz は PS ドメインに偏在することが分かった。合成した色素、RRa-P3HT、PS の各表面エネルギー  $\gamma_X$  からそれぞれの組み合わせに対する界面エネルギー  $\gamma_{XY}$  を算出し、次式で定義される濡れ係数  $\omega_{dye} = (\gamma_{dye/P3HT} - \gamma_{dye/PS}) / \gamma_{P3HT/PS}$  を求めた。表面エネルギーの観点からは、濡れ係数が  $\omega_{dye} > 1$  のとき色素は P3HT ドメインに、濡れ係数が  $-1 < \omega_{dye} < 1$  のとき色素は界面に、濡れ係数が  $-1 > \omega_{dye}$  のとき色素は PS ドメインに存在すると予測される。濡れ係数からの予測位置と上述の AFM 表面形態像による色素の偏在位置は一致することが分かった。以上の結果より、異なる官能基を導入することによって色素の表面エネルギーの制御が可能であり、ブレンド膜内における色素の偏在位置を任意に制御できることが分かった。

◇増感色素を用いた有機・無機ハイブリッド太陽電池

次に、中心研究者が開発する有機・無機ハイブリッド太陽電池でも、増感色素による効率向上が可能かを検証した。そこで、ドナー材料に P3HT 共役高分子、アクセプター材料に酸化亜鉛金属酸化物を用いた有機・無機ハイブリッド太陽電池に、近赤外色素である SiPc6 を導入し、色素増感効果を検証した。その結果、SiPc6 の重量濃度が 7wt%の時に最も高い増感特性を示し、短絡電流は 2.2 から 3.6 mA cm<sup>-2</sup>へと 64%向上した。SiPc6 の吸収帯である 680 nm 付近に鋭い EQE ピークを示しており、導入した SiPc6 が電流発生に寄与していることを示している。つまり、SiPc6 は P3HT と ZnO の界面に存在することを示唆している。また、P3HT の吸収帯域である 500-600 nm にかけて外部量子効率が増大しており、SiPc6 の導入により P3HT 励起子がより効果的に界面に捕集されていることを示している。これは SiPc6 が P3HT

と ZnO の界面に存在することにより、P3HT 励起子がエネルギー移動により界面に捕集されるためであると推察される。以上の結果より、有機・無機ハイブリッド太陽電池に対しても近赤外色素を導入することによって、光捕集効率を向上できることが分かった。

#### ■サブテーマ④：計測法の開発と標準化活動の推進（東京大学 富田孝司）

##### ・本サブテーマにおいて本年度達成した内容のまとめ

有機太陽電池の分野では、現時点で IEC 規格が成立しておらず、既存の太陽電池の規格に準じて性能評価、耐久性評価を行っている。しかしながら、有機系太陽電池の持つ特性の特異性により、既存の規格に準じた計測方法では、真に信頼性のある性能評価結果と耐久性評価結果が得られない状況にある。この様な状況を踏まえ、当課題においては、信頼性のある性能と耐久性評価方法の確立と合わせて、標準化に向けた活動を相互に連携させながら進めている。

##### ・実施内容④-1：「国際電気標準会議(IEC)国際標準制定のための活動」

有機系太陽電池の国際標準化に向け、前 IEC 市場戦略評議会評議員である東京大学富田特任教授をリーダーとし、本課題の成果を IEC の標準に反映させる事を目的とした活動の中で、いくつかの活動を IEC に対して実施した。IEC TC113 ヘドイ ツ ナショナルコミッティが提案した“有機薄膜太陽電池の信頼性”に関する新テーマ検討の背景と内容の精査を行ったところ、太陽光発電システムを扱う TC82 ではなく、ナノエレクトロニクスを扱う TC113 にて提案されたこと、NREL（米国再生可能エネルギー研究所）が 2008 年より先行実施している国際的な活動（有機薄膜 PV の信頼性評価）を十分に考慮していないこと、有機系太陽電池の代表格の一つである色素増感太陽電池が含まれなくなる可能性があることが明らかになった。こうした状況から、本件の IEC 国内審議団体である電子情報技術産業協会（JEITA）の場を通して、以下の 2 点を主要なポイントとして提案し、国際合意に向けた活動を実施した。

- (1) 本ドイツ提案は受け入れるものとするも、色素増感太陽電池を含めた有機系太陽電池全体をスコープとすること。
- (2) “信頼性”を評価すべき“測定法”についての視点が欠落している事について、これを TC113 にて議論することを前提とすべきではない。

その結果、提案事項(1)については、色素増感太陽電池を提案内容に含めることの国際合意が成立した。提案事項(2)に関しては、TC113 の国際会議の場での提案をし、今後の審議事項とすることが合意された。

また、④-2 で開発を進めている色素増感太陽電池の性能評価法の提案を目指し、有機系太陽電池技術研究組合との共催で、ICES2013 国際会議(有機系太陽電池の評価と標準化に関する国際会議、2013 年 1 月)を開催した。この国際会議の場では、海外の有力な研究者に対して、IEC を舞台にした日本の活動を説明するとともに、色素増感太陽電池の性能評価法原案

を説明した。会議には、実際に、欧州、アジアの主要な研究者の間で本件提案についての理解が得られ、国際世論を形成できた。

・実施内容④-2：「色素増感太陽電池の性能評価方法・耐久性評価方法の開発」

色素増感太陽電池については、平成 21 年 3 月に OITDA 規格案「色素増感太陽電池の性能評価方法」が提案されている。当課題ではそれを基本にして、これらを性能評価方法の規格案として、FIRST プログラムの計測・標準化分科会、関係機関・関係企業・業界団体等との議論を経て原案の修正を行った。また、原案は④-1 の ICES2013 において提案した。

DSC 性能評価測定法原案

- (a) DSC 性能評価のための KAST 提案の準拠規格は、国際電気標準会議（IEC）国際規格化を目指す観点から、全て IEC60904-1～10 と IEC61646 に統一した。
- (b) OITDA 規格案では、照射光量較正用基準太陽電池は被測定セルと同一であると規定されているが、それらが入手困難な場合には、色素増感用一次および二次基準太陽電池は分光感度特性を近似した一次および二次疑似基準太陽電池を用いても構わないものとした。
- (c) 基準太陽光（AM1.5G、1000W/m<sup>2</sup>）としてソーラシミュレータを用いるが、ソーラシミュレータのスペクトル分布において、測定セルの光吸収域に輝線が多く見られる場合には、相対エネルギー分布が基準太陽光と近い場合であっても誤差を生じる要因となりうる。これを回避するため測定対象とする色素増感太陽電池の吸収波長領域においてなるべく輝線の少ないソーラシミュレータを用いるか、二次基準太陽電池セルの選定を慎重に行い、スペクトルミスマッチを 2 %以下とすることが望ましいとした。
- (d) 分光感度（IPCE）測定については、光強度と短絡電流との間に線形な相関が見られる単色光強度領域で行われるが、IPCE を I-V 測定とできるだけ同じ条件下で測定するために、1000W/m<sup>2</sup> の AM1.5G 近似の白色バイアス光を重畳した交流（AC）測定法で行う。なお、屋内用途や散乱光の利用など実際の使用環境と照らし合わせた際に、より適切なバイアス光の条件が他に設定できる場合には、その使用環境と設定条件を明記した上でそちらの測定値を提示してもよいとした。
- (e) DC 法（バイアス光照射無し）での測定については、その IPCE 値から算出される短絡電流値が、1000W/m<sup>2</sup>、AM1.5G の光源下での出力測定で得られる短絡電流値よりも数%程度過大となる。これに対して、バイアス光照射なしの DC 法では白色バイアス光の光量やスペクトルの影響がないため、同一機関内での測定の再現性が高く、また異なる機関間でも同一サンプルの測定値の差異が出にくいというメリットがある。そのため研究開発段階における相互比較については、数%程度の過大評価であることを相互に十分に認識した上で、バイアス光照射なしの DC 法を用いても構わないとした。
- (f) IPCE 測定で白色バイアス光を重畳し、単色光をチョッピングする場合、単色光に対する電流応答が定常値を示すまで十分な時間を置いた後にデータを取り込むことができるよう、適切なチョッピング周波数を選択して測定しなければならない。敢えて具体的な

チョッピング周波数は記さなかった。

- (g) バイアス電圧をステップ状に変化させて測定する I-V 特性測定では、個々のステップにおいて電流が定常値を示したのちにデータを取り込む必要がある。そのため、一般的には、順方向（短絡から開放）および逆方向（開放から短絡）の掃引で同等の I-V 特性が得られるように、十分に長い掃引時間を設定する。適切な掃引時間はセル構成材料や構造に依存するので、それぞれのセルで検討が必要である。この場合も敢えて具体的な掃引時間は記していない。
- (h) 測定中のセル温度は、 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ が望ましい。ここで、光照射によってセル温度が上昇すると一般にセル特性が変化し、その変化率は、被測定セルの構成（材料、構造等）に大きく依存するので注意が必要である。しかしながら、使用環境と照らし合わせて妥当であれば、 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以外の温度での測定値を参考値として付加してもよいとした。
- (i) 色素の種類によっては、紫外放射で著しく劣化するものがある。従って、350nm 未満のソーラシミュレータの紫外放射は基準太陽光の紫外放射を超えないように制限することが望ましい。光照射によって特性が変化する場合があるので、照射直後の測定結果と 30 分から 1 時間程度照射したのちの測定結果とを比較して、安定化を確認する必要がある。ただし、色素の種類によっては長期間安定しないものがあるので注意が必要である。

#### ・実施内容④-3：「有機薄膜太陽電池の耐久性評価方法の開発」

有機薄膜太陽電池の性能評価方法の規格化・標準化についても、色素増感太陽電池同様、国際的に未整備で、他機関とのデータの比較や問題点を議論する上で評価方法を統一することは必要である。有機薄膜太陽電池は、性能評価方法については概ねアモルファスシリコン太陽電池の規格に沿った性能評価が可能であることから、当課題では耐久性評価方法について検討を行った。

通常太陽電池の劣化試験で用いられる蛍光灯式紫外線照射装置による劣化加速試験に加え、LED シミュレーターによる劣化モードの特定も試みた。LED の放射光スペクトルの制御プログラムを調整し、特定の波長領域光を照射し、照射光の波長帯と劣化との相関を検討した。現在、光照射による初期劣化の度合いの判定を進めており、蛍光灯式紫外線照射装置による劣化加速試験を検討しており結果が待たれる。

また、昨年度開発したキャリアライフタイム計測装置（ $\mu$ -PCD 法）を用いることで、有機薄膜太陽電池セル内の発電層のみの性能評価を行うことが可能であることから、従来の電流計測による評価方法を併用することで、非破壊で劣化部位を特定することができる。それ故、本装置を用いて各経過時間における劣化部位を特定すれば、高耐久性化に向けた太陽電池セルの設計指針や適切な評価方法の確立が期待できる。本評価法で、計測時の試料セルの光劣化を検証したところ、現状での測定条件で励起レーザーを 7 時間照射し続けた場合でも、キャリアライフタイムや IV 特性への影響は見受けられなかった。同時に、共同研究先から提供を受けた封止済み有機薄膜太陽電池セルについても、キャリアライフタイムの計測を可能なことを確認にした。



なお、研究計画書に記載はないが、以下の内容を実施した。

■有機系太陽電池に関する特許動向調査（研究支援担当機関による実施）

平成 24 年度は、総合科学技術会議からの指摘に基づき、本研究成果の着実な実用化を支援するため、研究支援担当機関により、有機系太陽電池に関する特許動向調査を実施した。

調査は「色素増感型太陽電池」、「有機薄膜型太陽電池」、「色素増感・有機薄膜ハイブリッド型太陽電池」を対象とし、優先権主張年 1988 年以降から直近まで、特許動向調査を行った。対象国としては、日本、米国、欧州、中国、韓国、豪州、台湾とし、出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率等の分析を行った。「色素増感型太陽電池」および「有機薄膜型太陽電池」では日本の特許出願件数が最も多いが、近年中国・韓国の件数が増加していた。

また、研究開発動向では、発電効率競争において世界トップレベルであることを確認した。一方で、特許出願から公開までの動向を把握するために行った論文調査では、件数的には「色素増感型太陽電池」では中国等、「有機薄膜型太陽電池」では欧州等が多く、研究開発競争が激しくなっている状況であった。「色素増感・有機薄膜ハイブリッド型太陽電池」としては、新規概念を応用した様々なタイプが提案されており、発電効率の向上のみならず、耐久性改善も期待できるため、今後の有機系太陽電池開発で重要と考えられる。

さらに、政策動向として、有機系太陽電池に関わる国家の開発プロジェクトの調査を行った。市場環境調査として、本分野ではまだ市場が立ち上がっていないため、主要開発企業の製品化動向について調査を行った。そして今後の商品化のために、有機系太陽電池の発電特性を活かせる用途に応じた性能達成が重要であることから、「軽量・フレキシブル性」、「斜めから光が入っても発電できる特性」、「弱い光でも発電する特性」および「透明性やカラー・デザイン等の意匠性」の区分に対し、要素技術と製造技術として何が重要かという観点から、注目すべき研究テーマについて整理した。

以上の調査・分析を踏まえ、日本が取り組むべき課題、目指すべき研究開発、技術開発の方向性として、以下の結論を得た。

- (1) 有機系太陽電池の産官学一体となった研究開発の推進を行う。
- (2) 発電特性を活かせる商品分野での新規アプリケーション開発とその商品化に必要な技術の強化を行う。
- (3) バリューチェーンのどの部分から利益を得るかという事業形態にあった戦略的特許出願が必要である。
- (4) 国際標準化では、実発電量、室内光基準、入射角依存性等有機系太陽電池の優位性をアピールできる分野の規格化を狙う。

## 2. 研究開発・支援体制

番号	補助事業者名	担当(支援)したサブテーマ名	主な業務(支援)の内容
1	新エネルギー ・産業技術総 合開発機構	1～4のすべてのサブテーマお よび特許動向調査	プロジェクトマネジメントによ る研究支援