

色素増感太陽電池の特性評価技術

Correct Methods of Measuring Cell Performance of Dye-sensitized Solar Cells

小出直城* 千葉恭男* 韓礼元*
Naoki Koide Yasuo Chiba Liyuan Han

要 旨

色素増感太陽電池の特性評価方法について検討を行った。シリコン太陽電池と比較して、色素増感太陽電池の電流-電圧(I-V)特性は、電圧掃引条件(方向, 速度)により大きく影響を受けることが判明した。また、ステップ電圧応答特性の評価により、色素増感太陽電池はシリコン太陽電池よりも大きな時定数を有していることが判った。さらに、光照射条件についても検討を行い、色素増感太陽電池の正確で簡便な評価方法を提案した。

We investigated characterization methods for dye-sensitized solar cells (DSCs) in comparison with those of crystalline silicon solar cells. It was found that the current-voltage (I-V) characteristics of DSCs are dependent on voltage sweep direction and measuring time. Measurement of the transient photocurrent revealed that this dependence is due to the longer time constant of DSCs. To improve accuracy, the accurate and quick evaluation method of cell performance for DSCs was proposed.

まえがき

地球温暖化やオゾン層破壊、資源の枯渇などの問題から、地球環境保全の重要性が高まっている。化石燃料に代わるクリーンなエネルギー源として、環境負荷の少ない太陽電池は大きな注目を集めており、世界の太陽電池生産量は、1998年以降、前年比30%以上の成長を毎年続けている。現在の主流はシリコン太陽電池であるが、原材料となるシリコンウェアの供給に制限されることなく、より一層の普及拡大を実現していくためには、新材料を用いた次世代太陽電池の開発が必要不可欠である。このような背景の下、酸化チタン、増感色素、ヨウ素系酸化還元種(I/I_3^-)を含む電解液などの廉価な材料で構成される色素増感太陽電池は、真空プロセスを使用しないことから、次世代太陽電池の有効な候補として期待を集めている¹⁻⁴⁾。近年では、新規色素や電解液の固体化など、色素増感太陽電池の実用化を目指した研究が数多く行われている。

しかし、色素増感太陽電池のセル特性の評価方法については測定光源の校正に関する報告例があるものの^{5, 6)}、それ以外の測定条件に関する研究はほとんどなされていない。そのため、色素増感太陽電池のI-V

特性は、従来のシリコン太陽電池と同様の方法で評価されているのが現状である。色素増感太陽電池とシリコン太陽電池では、その構成材料や発電メカニズムが異なっている。それにもかかわらず、色素増感太陽電池の特性をシリコン太陽電池と同様の方法で評価することの正当性はこれまでほとんど議論されてこなかった。2001年、国際的な標準試験機関の1つであるNRELにおける測定結果として変換効率10.4%が報告されたが⁴⁾、詳細な測定条件(電圧掃引方向, 電圧掃引速度等)は報告されていない。また、色素増感太陽電池の業界は、電気化学, 合成化学, 物理化学など多分野からの研究者が多く、セル面積の規定方法をはじめ、各研究機関の間で異なる評価方法がとられている。そのため、発表された効率を再現出来ないケースも散見される。

本稿では、当社で行われた色素増感太陽電池のI-V特性の測定方法に関する研究結果を解説する^{7, 8)}。電圧掃引条件(方向, 速度)が観測されるI-V特性にどのように影響を与えるかについて説明し、さらに、ステップ電圧応答特性の測定を通してその現象に考察を加え、色素増感太陽電池の正確で簡便な評価方法を提案する。

* 技術本部 エコロジー技術開発センター 第二開発室

1. 電流 - 電圧特性の測定方法

一般に、太陽電池の出力特性の測定は、**図 1 (a)**に示すような、電圧計、電流計および負荷電源からなる測定回路を用いて行う。4端子法により電圧測定と電流測定を別々の回路で行うことで、電流計の内部抵抗や太陽電池のリード線の抵抗による効果を低減でき、正確な測定が可能となる。具体的には、対象となるセルに負荷電源から**図 1 (b)**に示すような階段状の電圧を印加し、セル両端の電圧と、電圧が変化してから一定の遅延時間が経過した後の電流を測定することで、**図 2**に示すようなI-V特性が得られる。

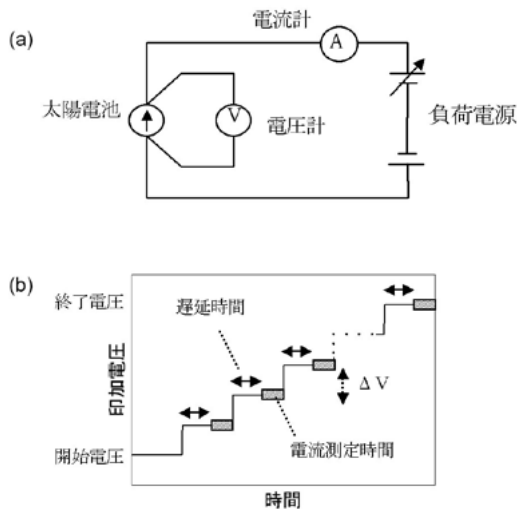


図 1 (a) 太陽電池特性の測定回路
(b) 印加電圧の時間依存性

Fig. 1 Typical circuits (a) and applied stepwise voltage (b) for I-V measurement of solar cells.

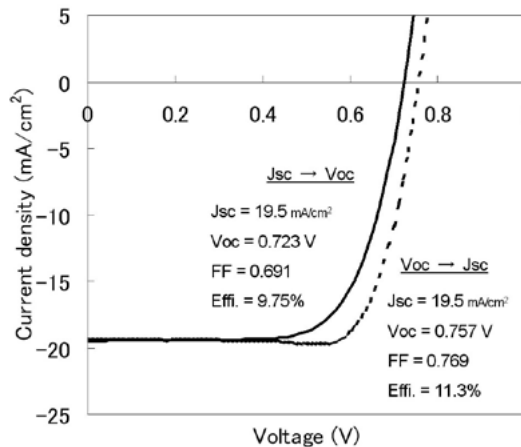


図 2 色素増感太陽電池の電流 - 電圧特性の測定例
Fig. 2 Example of the I-V curves of DSCs.

従来のシリコン太陽電池のI-V特性を評価する場合には、**図 1 (b)**に示す遅延時間をセルの時定数の4倍以上に設定する必要がある⁹⁾、一般には遅延時間は1msないしそれ以下に設定される。本検討では、電流測定時間を50ms、電圧間隔 ΔV を10mV、電圧掃引範囲を-0.1Vから0.9Vとし、掃引方向、遅延時間を変更してI-V特性の評価を行った。なお、測定はAM1.5 (100mW/cm²)の擬似太陽光スペクトルを有するソーラーシミュレータ光を照射し、セル温度25℃で行った。

まず、Black dyeを用いて色素増感太陽電池セルを作製した²⁾。得られた色素増感太陽電池のI-V特性を、従来のシリコン太陽電池と同様の条件（遅延時間1ms、掃引時間5秒）で測定した結果の一例を**図 2**に示す。実線は短絡電流(Jsc)状態から開放電圧(Voc)状態に向けて電圧を掃引した際の測定結果であり、点線はVoc状態からJsc状態に向けて電圧を掃引した際の測定結果である。Jscは電圧掃引方向に依存しないが、Voc、FFは電圧掃引方向により大きく影響を受け、変換効率が約15%も異なって観測されることがわかる。このような掃引方向による差はシリコン太陽電池では観測されない。**図 2**に示したI-V特性の差は、色素増感太陽電池が界面の多い複雑な構造を有していることに起因していると考えられる。この原因を明確にするために、ステップ電圧応答特性の測定を行った。

2. ステップ電圧応答特性

ステップ電圧応答特性は、AM1.5の光照射下において、電圧源から階段状の電圧(**図 1 (b)**)をセルに印加し、セルに直列に接続した参照抵抗部分の電圧をオシロスコープを用いて測定した。

まず、色素増感太陽電池とシリコン太陽電池の違いについて調べるため、遅延時間を1msとし、印加電圧をJscからVoc方向へ掃引しながら測定した結果を**図 3**に示す。色素増感太陽電池の場合(太線)、電圧を印加すると、応答電流にはオーバーシュート電流が観察され、数十msでは応答電流は平衡状態に達していないことがわかる。一方、シリコン太陽電池の場合(実線)、印加電圧の変化に対して出力電流はすぐに平衡状態に達していることがわかる。この応答時間の差が、I-V特性の掃引方向依存性の原因と考えられる。

色素増感太陽電池で応答時間が遅い原因は、セル内部に大きな電気容量成分を有しているためであると考えられる。実際、交流インピーダンス測定によれば、色素増感太陽電池の酸化チタン/色素/電解液界面の電気容量成分はmF/cm²オーダーであり¹⁰⁾、シリコン太陽電池の電気容量(μ F/cm²オーダー)¹¹⁾よりも3桁以上大きい。ナノサイズの酸化チタン微粒子で構成され

る多孔質半導体電極の表面積は、セル面積の数百倍から千倍に達することが知られており¹⁾、表面積の増大とともに電気容量も増大していると考えられる。また、色素増感太陽電池のセル内部には、酸化チタン界面以外にも、電解液/対極界面や電解液内部の拡散に起因した電気容量成分が存在しており^{8,10)}、セルの応答速度に影響を与えていると考えられる。

次に、色素増感太陽電池のステップ電圧応答特性における電圧掃引方向の影響について調べた。図4は、Voc近傍の電圧を階段状に印加した時のステップ電圧

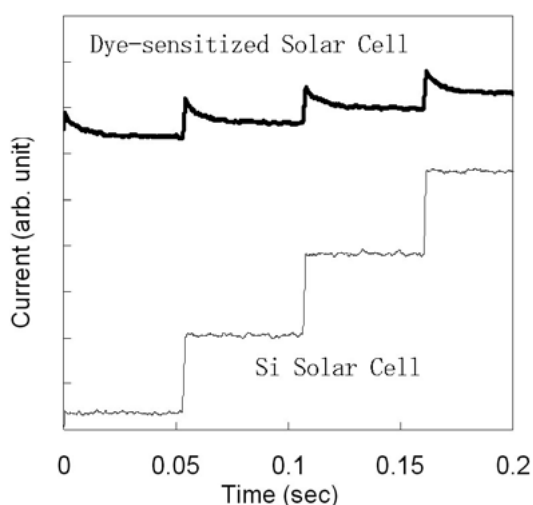


図3 色素増感太陽電池とシリコン太陽電池のステップ電圧応答特性の比較

Fig. 3 Transient photocurrent after application of stepwise voltage for DSC and Si Solar cell.

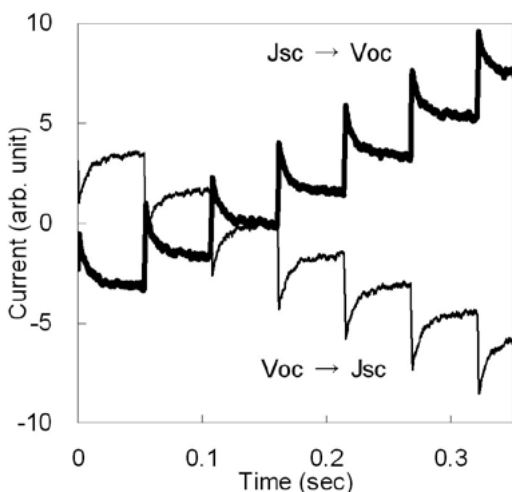


図4 色素増感太陽電池のステップ電圧応答特性：電圧掃引方向の比較

Fig. 4 Transient photocurrent of DSC as a function of the sweep direction.

応答特性を示しており、太線はJscからVoc方向に電圧を掃引した場合、実線はVocからJsc方向に電圧を掃引した場合の光電流応答である。JscからVoc方向に電圧を掃引した場合には、図4に見られるプラスのオーバーシュート電流のために実際よりも早く電流がゼロに到達する。その結果、Vocは実際よりも低く観測されることになる。一方、VocからJsc方向に電圧を掃引した場合、マイナスのオーバーシュート電流により電流値は常に実際よりも低く観測される。その結果、電流値は実際よりも早くゼロに到達するため、Vocは実際よりも高く観測されることになる。このように、ステップ電圧応答特性の測定により、電圧掃引方向によってVocが異なって観測される現象の原因が明確になった。

3. 色素増感太陽電池の正確な評価方法

太陽電池の評価方法としては、セル特性が測定条件の誤差により過大評価されないことが前提となる。ここでは、色素増感太陽電池の正確な評価方法について考察する。

3.1 電圧掃引条件

前節では、色素増感太陽電池の応答時間がシリコン太陽電池に比べて非常に遅いことがわかった。また、そのことに起因して、電圧掃引方向によりI-V特性に差が観測された。そこで、電圧掃引方向、および掃引時間を変化させた場合のI-V特性の測定結果を図5に示す。遅延時間を(a) 1 ms, (b) 40ms, (c) 100ms, (d) 200msと変化させたとき、電圧掃引時間はそれぞれ(a) 5秒, (b) 9秒, (c) 15秒, (d) 25秒となる。図5の実線はJscからVoc方向に電圧を掃引した時のI-V特性であり、点線はVocからJsc方向に電圧を掃引した時のI-V特性である。これらの測定から、色素増感太陽電池のVoc, FF, および変換効率は、電圧をVocからJsc方向に掃引した場合には、JscからVoc方向に掃引した場合よりも高く観測され、過大評価されることがわかった。したがって、正確な評価を行うためには、電圧をJscからVoc方向に掃引しなければならない。また、電圧掃引方向によるI-V特性の差は、掃引時間の増大とともに減少していくことも判明した。すなわち、掃引時間が9秒以下の場合(図5(a),(b))には、掃引方向によるI-V特性の差が顕著なものに対し、掃引時間が25秒以上(図5(d))の場合には、両方向から掃引した時のI-V特性が、ほぼ一致していることがわかる。

このことをより明確に示すため、太陽電池特性の測定条件依存性を表1にまとめた。掃引時間を15秒以上とした場合、掃引方向による変換効率の測定誤差は

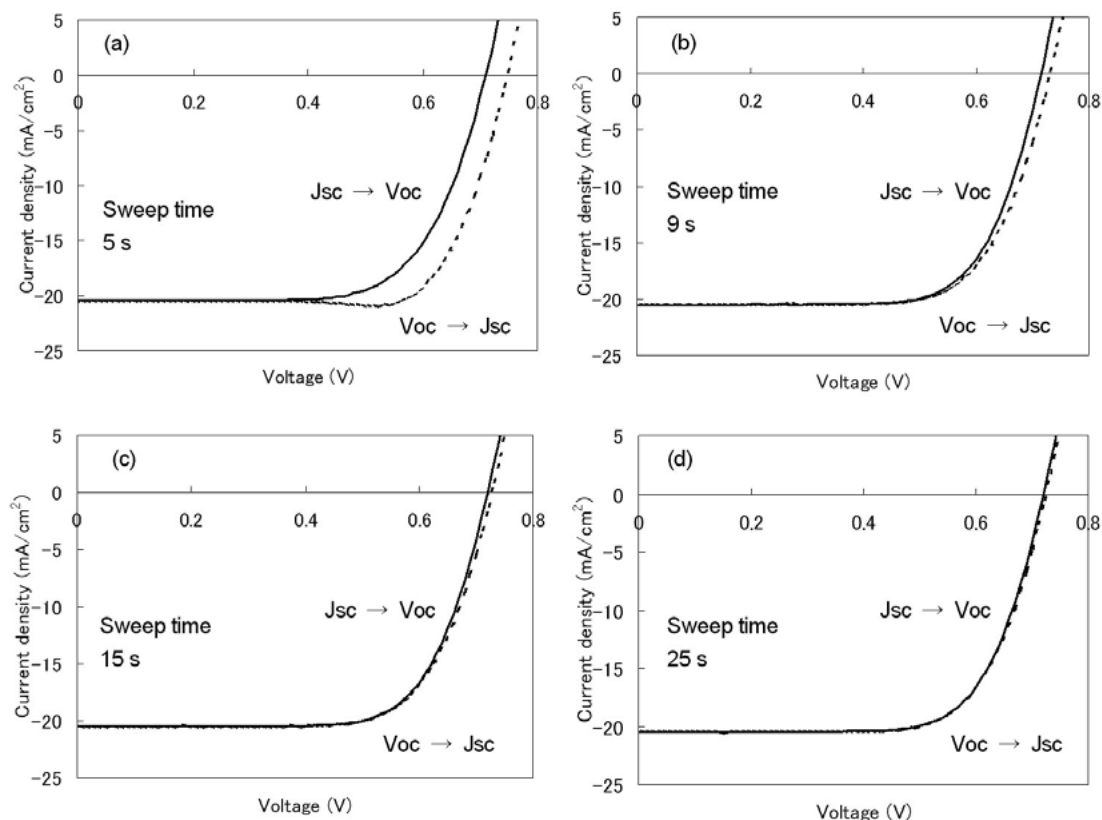


図5 色素増感太陽電池の電流－電圧特性の電圧掃引条件依存性の一例

Fig. 5 Example of the I-V curves of DSC as functions of the sweep direction and sweep time.

表1 太陽電池特性の測定条件依存性の一例

Table 1 Example of the I-V parameters of DSC as functions of the sweep direction and sweep time.

Cell type	掃引時間 (秒)	掃引方向	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF	η (%)	η average (%)
DSC	5	Jsc → Voc	20.5	0.709	0.682	9.94	10.8
		Voc → Jsc	20.5	0.748	0.760	11.65	
	6	Jsc → Voc	20.5	0.714	0.704	10.33	10.6
		Voc → Jsc	20.5	0.739	0.719	10.90	
	9	Jsc → Voc	20.5	0.716	0.708	10.42	10.5
		Voc → Jsc	20.5	0.731	0.706	10.60	
	15	Jsc → Voc	20.5	0.720	0.707	10.45	10.5
		Voc → Jsc	20.5	0.728	0.705	10.54	
	25	Jsc → Voc	20.5	0.721	0.708	10.45	10.5
		Voc → Jsc	20.5	0.725	0.705	10.49	
	45	Jsc → Voc	20.5	0.722	0.707	10.46	10.5
		Voc → Jsc	20.5	0.724	0.704	10.46	
Si	5	Jsc → Voc	36.7	0.644	0.713	16.9	16.9
		Voc → Jsc	36.7	0.644	0.713	16.9	

1%未満であり、精度の良い測定が行えていることがわかる。以上の結果から、色素増感太陽電池のセル特性を、過大評価することなく正確に評価するためには、電圧掃引方向はJscからVocの方向とし、掃引時間15秒以上で測定を行うべきである。

ここで、表1の最右列には、両掃引方向から測定した変換効率の平均値も同時に示した。両方向から測

定した変換効率には大きな誤差があるものの、掃引時間の延長によりその誤差は減少していき、両方向からの測定で得られた変換効率の平均値は掃引時間9秒以上でほぼ一定となっている。迅速な評価とフィードバックのためには測定時間を短縮化させることが好ましく、掃引時間を9秒以上とし、両方向の電圧掃引を行い、得られたセル特性の平均値を取る方法も、簡便で正

確な測定方法として有効である。なお、以上に示した結果は、電解質層にアセトニトリルを用いた液体セルの結果である。セルの応答時間は電解質層に用いる材料の種類によって異なる可能性があるため、用いる材料毎にセルの応答時間に合わせた掃引時間を確認し、設定することが必要である。

3.2 光照射条件

太陽電池の屋外における実際の出力は、設置する場所の日射量等の気候によって大きく左右される。評価結果の国際整合性を確保するためにも、国際的に統一された基準太陽光スペクトル（AM1.5の擬似太陽光スペクトル）等の標準試験条件が規定されており、日本を含め世界各国で、国立またはそれに準ずる標準試験機関で維持されている¹²⁾。

したがって、太陽電池の特性評価は基準太陽光スペクトルの照射下で行われるべきである。ここで、基準太陽光スペクトルとソーラーシミュレータのスペクトルに差が存在すると、セルの出力特性にも差が生じるため、まずはスペクトルマッチングの良いソーラーシミュレータを用意することが重要である。しかしながら、厳密にスペクトルマッチングのとれたソーラーシミュレータを用意することは技術的に非常に困難である。そこで、実際には評価する太陽電池セルと同様の分光感度特性を有する基準太陽電池セルを用意し、上述の標準試験機関が保有する高近似シミュレータにより基準太陽電池セルの短絡電流値の校正を行い、その基準太陽電池セルの短絡電流値が校正値と等しくなるようにソーラーシミュレータの光量を調整した上で、測定を行う必要がある¹²⁾。

また、国際整合性の確保された、より正確な特性を確認するためには、上述の標準試験機関による評価が必要不可欠となる。

3.3 光照射領域とセル面積の規定

太陽電池のセル特性評価時には、光照射領域とセル面積の規定方法にも注意が必要である。すなわち、**図6(a)**に示したように、セル発電領域（一般的には色素が吸着した酸化チタン電極の面積に相当）以外にも光が照射された場合、周囲からの散乱光が発電領域に照射し発電に寄与するため、セル特性を過大評価してしまう。色素増感太陽電池に関する報告では、発電領域よりも大きな開口部を有する遮光マスクを用い、CCDカメラで測定した酸化チタン電極面積をセルの面積と規定してI-V特性を評価した報告が多いが、正確な評価を行うためには、**図6(b)**に示すように、遮光マスクを用いて周囲からの光照射を遮蔽し、遮光マスクの開口部面積をセル面積（アパーチャ面積）と規定する必要がある。

ある。

ここで、発電領域よりも大きな開口部を持つ遮光マスクを用い、その開口部面積をセル面積と規定すると、発電に寄与しない部分もセル面積とみなすこととなるために変換効率は低下してしまう。また、発電領域よりも小さな開口部を有する遮光マスクを用いると、遮光された部分が常に暗状態（電圧ゼロ）となるため、Vocの低下を引き起こし変換効率が低下してしまうため好ましくない。したがって、発電領域と同じ大きさの開口部を有する遮光マスクを用いるべきであるが、色素増感太陽電池の発電領域は塗布法または印刷法で形成されるため、**図7**に濃色で示した領域のように、酸化チタン電極の縁にはギザギザ状の凹凸を生じるケースが一般的である。そのため、電極面積の正確な評価や、発電部分と完全に同じ大きさの開口部を有す

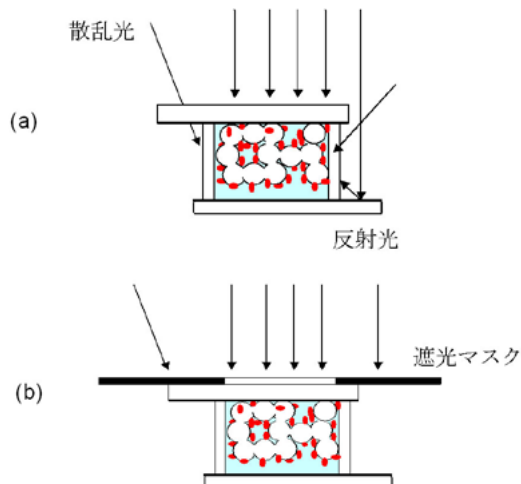


図6 特性評価時の遮光マスクの影響を示す概念図：(a) 遮光マスク無し (b) 遮光マスク有り

Fig. 6 An illustration of the effect of shading masks for I-V measurement.



図7 遮光マスクの設置方法の一例

Fig. 7 Example of a proper use of shading masks for I-V measurement for DSCs.

る遮光マスクの用意が非常に困難となる。そこで、周囲からの光照射を遮蔽すると同時に、電極面積の測定を不要とするために、実際の発電領域よりも若干小さい開口部(図7の点線参照)を有する遮光マスクの使用が実用的である。ただし、極端に面積の小さな遮光マスクを用いると、前述のVocの低下や、アパーチャ面積の測定誤差、開口部側面からの反射光の影響などが相対的に増大するため、正確な評価が困難になるので注意が必要である。

遮光マスクの材質としては、太陽電池が感度を有する波長領域の光を完全に遮蔽し、かつ反射率が低いものを用いる必要がある。なお、当センターでは、黒色つや消し加工を施したメタルマスク(透過率:0%,反射率:5%以下)を使用している。マスクの板厚としては、開口部側面からの反射光抑制の観点から薄いほうが好ましいが、ハンドリング性も加味し、0.2mm程度のものが実用的である。この際、開口部の側面にも黒色加工を施すことが重要である。また、黒色塗料や黒色テープを用いてもある程度の遮光効果は得られるが、透過率や反射率を十分に低減できない場合が多いため、使用の際には注意が必要である。

周囲からの光照射による測定誤差の影響を詳しく見るために、色素増感太陽電池セル(5mm角,10mm角)と、文献¹³⁾の方法で作製した微結晶シリコン薄膜太陽電池セル(10mm角)を用意し、遮光マスク有無の条件で太陽電池特性の測定を行った。測定結果の一例を表2に示す。遮光マスク無しの方法では、遮光マスク有りの正確な方法に比べJscおよび変換効率が過大評価されていることがわかる。この過大評価の問題は太陽電池の種類によらない。一般に、遮光マスク無しの方法では、10mm角セルで5~10%程度、5mm角セルで10~20%程度過大評価される。周囲からの光照射の影響はセルサイズが小さくなるほど顕著となるため、正確な評価を行うためには10mm角以上のセルサイズで評価を行うことが好ましい。

また、周囲からの光照射による測定誤差の影響をさらに詳しく見るために、同条件で作製した5つの色素増感太陽電池セル(5mm角)の変換効率を、(1)遮光マ

表2 遮光マスク有無による太陽電池特性への影響の一例
Table 2 Influence of the mask on the cell performance of DSCs and μ c-Si solar cells.

サイズ	種類	マスク	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF	η (%)
10mm角	DSC	なし	22.8	0.73	0.66	10.9
		有	20.8	0.73	0.67	10.2
	μ c-Si	なし	25.7	0.52	0.70	9.3
		有	24.5	0.52	0.70	8.9
5mm角	DSC	なし	24.1	0.72	0.69	12.0
		有	20.7	0.72	0.71	10.6

スク無し、酸化チタン電極の面積をセル面積として規定、(2)遮光マスク有り、遮光マスクの開口部の面積をセル面積(アパーチャ面積)として規定、の二つの条件で評価した。結果を表3に示す。色素増感太陽電池の業界の一部で用いられている(1)の方法では2%程度のバラツキが観測されたが、太陽電池業界で一般的に用いられている遮光マスクを用いた(2)の方法ではバラツキは0.2%程度に抑制された。色素増感太陽電池のみならず、透明電極を用いた薄膜太陽電池の研究開発分野では、透明電極部分の抵抗ロスを低減するために、銀ペーストなどの導電性材料をセル周辺部に設置する手法が広く用いられている。遮光マスク無しの場合に観測される変換効率のバラツキの主たる原因は、銀ペーストの形状が異なるために生じた周囲からの周

表3 遮光マスク有無によるDSC変換効率(%)への影響
Table 3 Influence of the mask on the efficiency of DSCs.

セルNo.	A	B	C	D	E
(1)遮光マスク無し	11.12	11.21	11.15	11.27	11.35
(2)遮光マスク有り	10.14	10.15	10.15	10.16	10.15

り込み光量のバラツキである。このバラツキは本質的でない誤差を与えるため、各種検討の効果を読み違える恐れが高くなる。このことから、遮光マスクを用いた正確な測定を行うべきである。

4. 標準試験条件による太陽電池評価

3.2節でも述べたように、国際整合性を確保するため

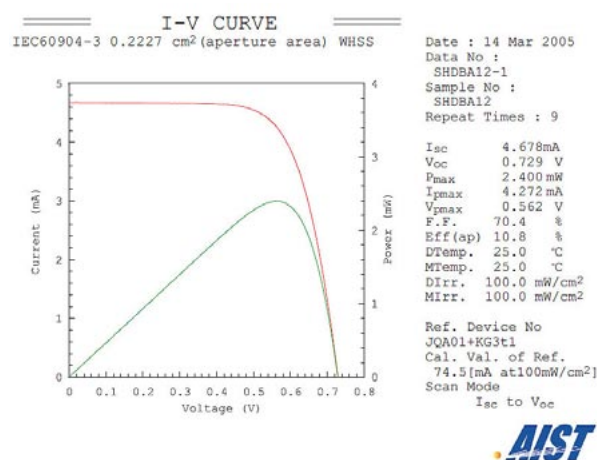


図8 標準試験機関により評価されたDSCのI-V特性
Fig. 8 The I-V characteristics of DSC measured by the public test center.

には、基準太陽光スペクトル、温度などの測定環境が整備された標準試験機関における特性評価が必要である。我々は、色素増感太陽電池の特性を正確に確認するために、国際的な標準試験機関の一つである、独立行政法人産業技術総合研究所 (AIST) 太陽光発電研究センターの評価チームにより、標準試験条件における特性評価を実施いただいた。その結果、図8に示すように、10%を超える変換効率を確認することができた¹⁴⁾。この結果は、JscからVoc方向への電圧掃引方法により過大評価することなく測定されたものであり¹⁵⁾、公正な方法により評価された色素増感太陽電池の世界最高の変換効率である。

むすび

本稿では、当社で行われた色素増感太陽電池の高効率化のための特性評価技術に関する研究結果を解説した。I-V特性測定時の電圧掃引条件(方向, 速度)依存性, ステップ電圧応答特性の測定を通してシリコン太陽電池との相違点を考察し, 色素増感太陽電池の特性評価技術に関して, 下記に示す評価方法を提案した。当社では, これら正確な評価技術に基づいた研究開発を推進することにより, 世界最高の変換効率10.8% (標準試験機関で確認)を達成している。

- 1) 電圧掃引条件として, 掃引方向はJscからVoc方向とし, セルの応答時間に合せた掃引時間(例えば15秒以上)を設定する。もしくは, 適切な掃引時間(例えば9秒以上)で両方向から測定を行い, 得られた特性の平均値をとる。
- 2) 光照射条件として, 測定対象と同様の分光感度特性を有し, 公的機関で出力値を校正された基準太陽電池セルを用い, ソーラーシミュレータの光量を調整する。
- 3) セル面積の規定方法として, 光照射時には遮光マスクを使用し, 開口部の面積(アパーチャ面積)をセル面積と規定する。
- 4) トップレベルの効率を発表する際には, 国際的な標準試験機関において確認する。

色素増感太陽電池の実用化に向け, 今後も正しい評価とフィードバックを積み重ね, 更なる高効率化を推進していく必要があると考える。

謝辞

本研究の一部は経済産業省から新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO) を通して委託され実施したものであり, 関係各位に感謝する。また, 色素増感太陽電池の正確な評価方法に関して有意義な議論をいただいた産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価チームの菱川善博 博士に感謝する。

参考文献

- 1) B. O'Regan and M. Graetzel, *Nature*, 353, pp.737-740 (1991).
- 2) M. K. Nazeeruddin, A. Kay, I. Rodicio, R. Humphry-Baker, E. Muller, P. Liska, N. Vlachopoulos, and M. Graetzel, *J. Am. Chem. Soc.*, 115, pp.6382-6390 (1993).
- 3) M. Graetzel, *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, 4, pp.145-153 (2003).
- 4) M. K. Nazeeruddin, P. Pechy, T. Renouard, S. M. Zakeeruddin, B. R. Humphry, P. Comte, P. Liska, L. Cevey, E. Costa, V. Shklover, L. Spiccia, G. B. Deacon, C. A. Bignozzi and M. Graetzel, *J. Am. Chem. Soc.*, 123, pp.1613-1624 (2001).
- 5) S. Ito, H. Matsui, K. Okada, S. Kusano, T. Kitamura, Y. Wada and S. Yanagida, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 82, pp.421-429 (2004).
- 6) 佐山和弘, 柳田真利, 菱川善博, 杉原秀樹: 電気化学会第72回大会講演要旨集 (2005年3月, 熊本) 3P22.
- 7) N. Koide and L. Han, *Rev. Sci. Instrum.*, 75, pp.2828-2831 (2004).
- 8) N. Koide, Y. Chiba and L. Han, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, pp.4176-4181 (2005).
- 9) Japanese Industrial Standard, JIS C 8913 (1998); Japanese Industrial Standard, JIS C 8934 (1995).
- 10) L. Han, N. Koide, Y. Chiba and T. Mitate, *Appl. Phys. Lett.*, 84, pp.2433-2435 (2004).
- 11) R. A. Kumar, M. S. Suresh and J. Nagaraju: *Rev. Sci. Instrum.*, 74, pp.3516-3519 (2003).
- 12) 菱川善博, 猪狩真一: 電機, 2002年8月号, pp.2-7 (2002).
- 13) Y. Nasuno, M. Kondo and A. Matsuda, *Appl. Phys. Lett.* 78, pp.2330-2332 (2001).
- 14) N. Koide et al., *Proc. 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (Florida)*, pp.175-176 (2005); L. Han et al., *Appl. Phys. Lett.* 86, pp.213501-1-3 (2005); Y. Chiba et al., *Proc. 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conf. (Shanghai)*, pp.665-666 (2005).
- 15) Y. Hishikawa, M. Yanagida and N. Koide, *Proc. of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (Florida)*, pp.67-70 (2005).

(2005年9月27日受理)