すべてが等しく造られているわけではないソーラシミュレータ

ゲイル・オーヴァートン

光起電力太陽電池の屋内環境での試験に必要な太陽放射照度とスペクトル出力を模擬する機器、いわゆるソーラシミュレータはすべてが等しく造られているわけではない。費用と性能のトレードオフを最適化するには、クラスA、B、Cのいずれか、定常状態かパルス状態かなどの仕様を注意深く再検討する必要がある。

ソーラシミュレータは太陽光起電力電池（PV）セルの光‐電気変換効率の正確な測定を可能にする。この太陽の放射照度とスペクトル出力を定量的に模擬する機器を使えば、PVメーカーは、照射のためにパネルを予測不可能な屋外環境に放置することなく、変換効率データを求めることができる（図1）。ソーラシミュレータは、その多くがキセノン光源を使用するタイプであり、多数のメーカーから入手可能である。それらはクラスA、B、Cのいずれか、定常状態かパルス状態か、いかによく太陽スペクトルと合致しているか、長時間にわたって照明均一性を維持するか、などの因子によって区別される。太陽電池セルとモジュールを定期的に試験するメーカーは、費用と性能のトレードオフを最適化するために、市販されている様々なソーラシミュレータの各仕様を注意深く調べる必要がある。

標準規格

太陽電池セルとモジュールの性能基準（変換効率、量子効率、電流電圧特性など）が数百のメーカー間で定量的に一致するように、ソーラシミュレータの標準規格が開発された。米国材料試験協会（ASTM; www.astm.org）、日本規格協会（JSA; www.jsa.or.jp）など、いくつかの国内標準化団体が存在するが、ソーラシミュレータの性能要件、仕様、試験プロトコルなどを詳しく列挙

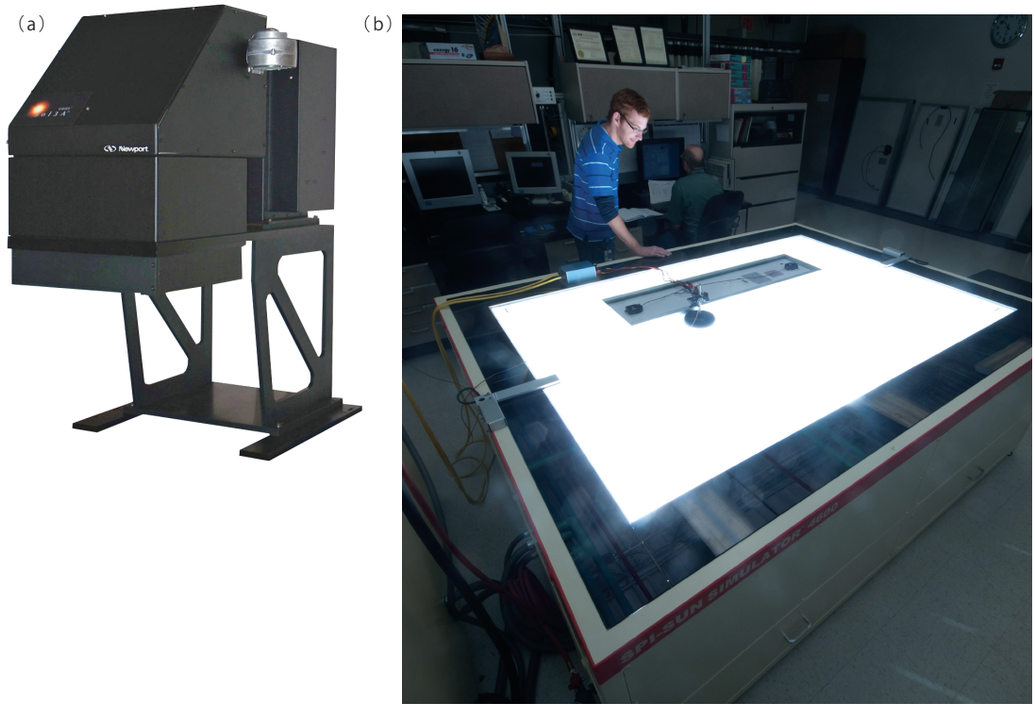

図1　ソーラシミュレータは多種多様な形状とサイズがあり、その能力も様々である。1台の大面積シミュレータ（a）が商用シリコンPVモジュールをテストしている。モジュールの裏側には技術者に向かう電圧および電流ワイヤが取り付けられていて、各端の2つの金属片がフラッシュ中の強度変動を補正する（資料提供：スパイア・ソーラ社）。多くの商用ソーラシミュレータ（b）はサイズがかなり小さい（資料提供：ニューポート・オリーエル・インスツルメンツ社）。

している主要な標準組織は国際電気標準会議（IEC; www.iec.ch）である。特定の標準―IEC60904-9 ed2.0、ASTM E927-10、JIS C8912―は、ソーラシミュレータを3桁の「クラスXYZ」で分類する。Xはスペクトル合致度（各波長範囲に対して指定された、必要とされる全放射照度のパーセンテージに対する実際のパーセンテージの比）を定義し、Yは放射照度の空間不均一性を定義し、Zは放射照度の時間不安定性を定義する（表1）。すなわち、クラスABBソーラシミュレータはクラスAのスペクトル合致度、クラスBの空間不均一性、クラスBの時間不安定性の仕様になる。

スペクトルマッチングに対して、各標準は、太陽光のスペクトル出力を最良に模擬するために、300～1100nmの波長範囲を100nmの波長間隔に区切って、そこに入らなければならないソーラシミュレータの全放射照度のパーセンテージを指定している（図2）。この波長範囲は、初期のPVセルの大半が単結晶シリコンでできていたことを考慮して、シリコンで典型的な吸収域をカバーするように歴史的に選択された。しかし、この範囲では、最高で1800nmを吸収するIII-V半導体材料を使用した集中型太陽光発電（CPV）システムやいくつかの新たな薄膜PV製品の性能を扱うことはできない。

国立再生可能エネルギー研究所（NREL）のセル・モジュール性能チームのマネージャー、キース・エメリー氏（Keith Emery）は、「たとえASTMとIECが太陽電池とモジュールメーカーに対してそれぞれ最小限のクラスBBBとクラスABCソーラシミュレータを使って試験するように要請したとしても、メーカーは賢明にもクラスAAAソーラシミュレータを選択するであろう。また、ある場合に比較的よい選択であったとしても、太陽電池製造工程の最大限の最適化を選択するであろう」と語っている。世界中の太陽電池メーカーに対する「NREL認定」試験の実施を31年間続けてきた、このチームのベテランであるエメリー氏は、シミュレータ結果と実際のPVモジュール出力との誤差がたとえ1%であったとしてもPVメーカーにとっては非常に大きな問題だと説明する。「セルとモジュールは一般にシミュレータのデータに従って値引きされ、そして価格設定されるので、エネルギー変換効率の誤差はメーカーの最終収益を直接左右する」とエメリー氏は言う。「そして、航空宇宙産業はAAAシミュレータよりもさらによい条件が得られる一層遠方へと飛び出すであろう。あなたがたも想像されるように、大気や環境効果を超えた宇宙へと飛び出す太陽電池は可能な限り小型・軽量に設計されなければならない。宇宙でのモジュールは大きすぎても小さすぎてもよくない」と付け加えた。

表1　ソーラシミュレータの標準規格の分類

3桁分類パラメータへの入力（*XYZ*）*	標準		
	ASTM	IEC	JIS
スペクトル合致度（*X*）			
クラスA	0.75～1.25	0.75～1.25	0.75～1.25
クラスB	0.6～1.4	0.6～1.4	0.6～1.4
クラスC	0.4～2.0	0.4～2.0	0.4～2.0
放射不均一性（*Y*）			
クラスA	≦3%	≦2%	≦2%
クラスB	≦5%	≦5%	≦3%
クラスC	≦10%	≦10%	≦10%
時間不安定性（*Z*）			
クラスA	≦2%	≦2%	≦1%
クラスB	≦5%	≦5%	≦3%
クラスC	≦10%	≦10%	≦10%

*例えば、クラスABBソーラシミュレータはクラスAのスペクトル合致度、クラスBの放射不均一性とクラスBの時間不安定性を持つ。

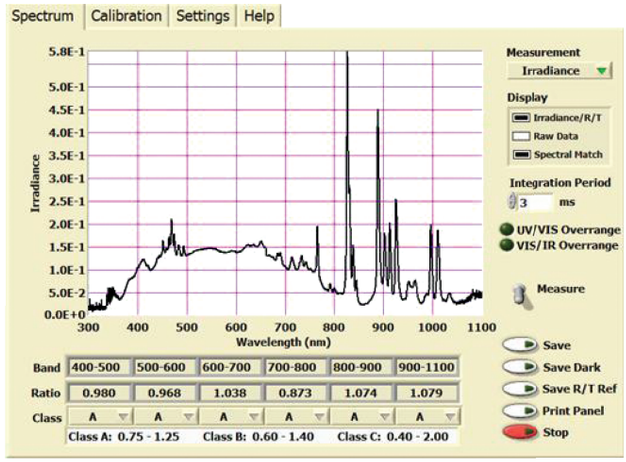

図2　コンピュータ制御のソーラシミュレータプログラムは、そのシミュレータのスペクトル出力が太陽からの実際の出力に基づく「基準」にいかによく整合するかを示すスペクトル整合データを収集する。このシミュレータの場合、波長バンドの各スペクトルマッチングはASTM E927クラスA基準を超える＋7.4%から－12.7%の範囲であった。（資料提供：フォト・エミッション・テック社）

設計考察

すべてのソーラシミュレータが同じに造られているわけではない。ソーラシミュレータのクラス間の差は主にシステムの光学系とシミュレータの光源

の違いによって大きくなる。

エメリー氏は、スペクトル合致度パラメータは比較的容易に補正でき、時間安定性の問題もセル／モジュールの条件設定プロセスで参照モジュールを使うことによって解決可能だが、ソーラシミュレータの空間不均一性が原因で起きる誤差は数値的に補正することは不可能だ、と語っている（図3）。「あいにく、空間不均一性はシミュレータの光路を横切るビームの不完全な均質化によって起きるだけでなく、白熱灯のエージングやランプの電圧ゆらぎによっても影響される」とエメリー氏は言う。彼は、画素パラメータが変化してもほとんど変化しないクラスAの空間均一性ソーラシミュレータを作ったとしても、白熱灯の近接場が瞬間的なピークを作ると、測定される画素サイズに依存する均一性マップが形成されることになると警告している。エメリー氏は、「これらの不均一性は、特に、シミュレータエリア上の位置を変えて小さな太陽電池をテストする場合に問題になるであろう」と付け加えた。

連続光源試験が太陽電池のホットスポット（セルまたはモジュール上を不均衡に加熱するゾーン）の識別に役立つ一方、パルス光源シミュレータはセル／モジュールの加熱の最小化の点で有利である。しかし、多くの薄膜PV技術は、電気化学応答時間が50～2000ms台で、1～100msのパルス長に比べて一般に長いため、パルス光源を使って評価することはできない。この規則の例外は、米スパイア・ソーラ社（Spire Solar）製の3500SLPと4600SLP Spi Sunソーラシミュレータであり、これらは短パルスシミュレータ特有の低い熱応力とクラスAAA性能を兼ね備えている。これらの装置は単一フラッシュで3重の（電流-電圧）I-V曲線を生成することによ

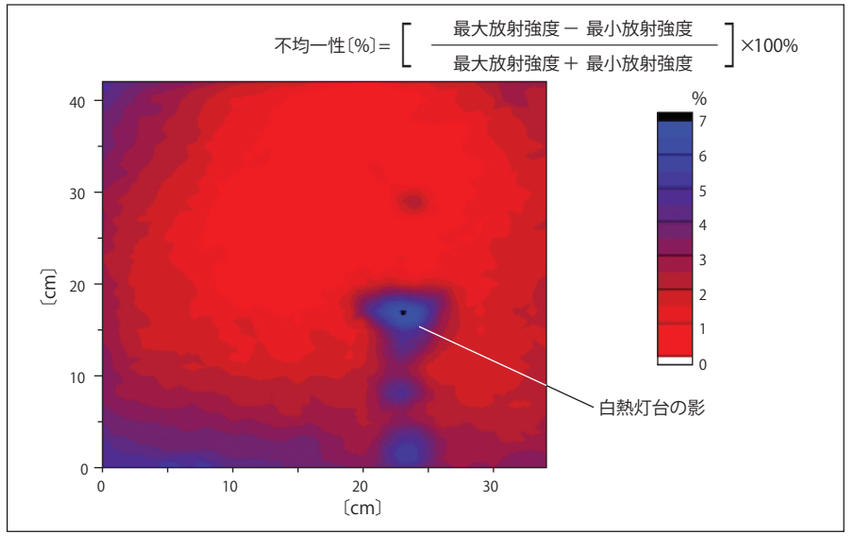

図3　SpectrolabモジュールX25ソーラシミュレータによる空間均一性マップにおける各色は1%の変動を表している；0.5cm直径の小さな画素サイズを使って小面積不均一性を探索した。（資料提供：NREL）

り結晶シリコンと薄膜モジュールの両方の測定用に20～100ms以上の範囲で調整可能なパルス幅を提供する。

米ニューポート・オリエール・インスツルメンツ社（Newport Oriel Instruments）のクラスAAA Sol3Aソーラシミュレータは数種のキセノン・アーク・ランプを使用する。点灯回数と耐用年数の基準にもよるが、照明面積300×300mmをもつ1.6kWランプの寿命は約2000時間である。ニューポート・オリエール社のシミュレータは、冷却と再スタートに要する時間を短縮し、NDフィルタまたはメッシュ型減光フィルタの取り付けのためにユニットをシャットダウンすることなしに照明を調整できる部分太陽減衰器付きで商品化されている。この機能ゆえに、Sol3Aは、オリエールのPVIV 2.0 I-Vテストソフトウエア、付属品、プロービング能力を使った、あらゆるタイプのPVセルにおける効率の線形性研究に理想的である。

ランプ寿命がソーラシミュレータシステムの全コストに影響する重要な因子であるとの認識に立ち、米アベット・テクノロジーズ社（Abet Technologies）は同社のSun2000とSun3000の定常状態照明シミュレータの光路を、標準の1kWではなく、たった550Wのキセノン・アーク・ランプを使って156×156mmのセル試験面積に対してクラスAAA性能を達成できるように最適化した（図4）。より小形なPVセル用に、アベット社はセル試験面積25mmのクラスABBシミュレータを5000ドル未満の価格で商品化した。2008年に、アベット社は、オランダのラッドバウド大学（Radboud University）と太陽計測会社ReRaに所属する計測学専門家のエリック・ハーバーカンプ氏（Erik Haverkamp）と提携し、テストステージ、電子負荷、ユーザフレンドリで標準準拠のソフトウエアならびに太陽参照セルを含む完全I-Vテストシステムの導入を実現した。

米フォトエミッション・テック社（PET）も最高30×30cmまでのセル試験面積をもつクラスAAA定常状態照明ソーラシミュレータをI-Vテストシステムとともに製造している[2]。PET社の社長

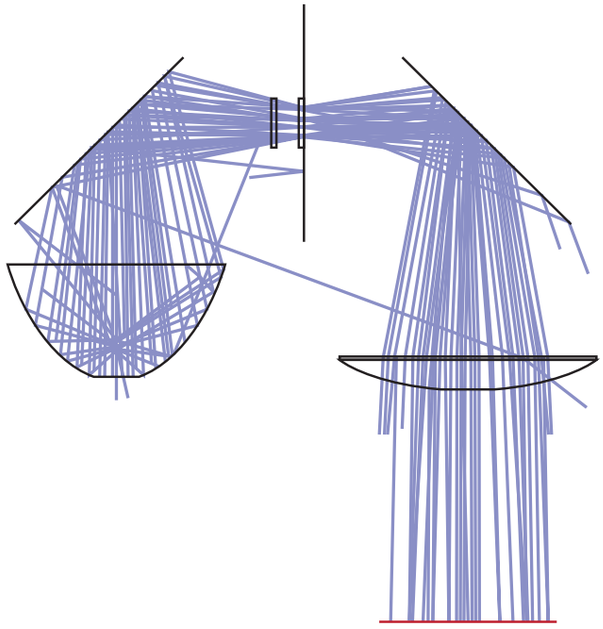

図4　ソーラシミュレータは楕円反射体を使ってキセノン・アーク・ランプからの光線を収集し、フライアイホモジナイザアセンブリ（中心部;2組の小形レンズアレイが光をスクランブルし、集光レンズとともに作業面における均一照明を創り出す）に向けて集光する。必要ならば、2つのフォールディングミラーが光を下向きにする。示されてはいないが、スペクトル成形フィルタはホモジナイザアセンブリのすぐ前に配置されている。（資料提供：アベット・テクノロジーズ社）

で共同設立者でもあるマントッシュ・チャウラ氏（Mantosh Chawla）は、「30年間ソーラシミュレータの製造を続けている日本の山下電装との緊密な研究によって、PETソーラシミュレータは競争相手を超えるいくつかの長所を手にした。約10%の強度損失を被る1～2枚の反射鏡を使ったフォールディング・ミラー設計とは異なり、われわれのインラインシステムは光を直接試験面に運ぶ設計であり、より少ない部品を使って、ランプ寿命の長いコンパクトな設計を実現している」と語っている。チャウラ氏は、PETはオンライントラブルシューティング用のインターネットを経由して全世界のコンピュータベースシミュレータシステムのいずれとも接続可能だと、主張している。

連続光シミュレータに加えて、カナダのサイエンステック社（Sciencetech）はCPVテスト用にクラスAAAのパルス型とコリメート型のソーラシミュレータも提供している。その全反射系は最高20.3cm直径の照明ターゲット用に150W～2.5kW範囲の5種類のキセノンランプを選択肢として持つ。フレネル・レンズ系は最高8.4平方インチのセル試験面積に対して0.7°内のコリメーションを達成する。サイエンステック社は30cm直径のターゲットを照明する三重光路ソーラシミュレータ（TOPS）、ならびに最高2m^{2}の面積を照明するフラッシュシステムも準備している。サイエンステック社の販売とテクニカル・サポート担当の専門家、ジェイミー・ブラール氏（Jamie Brar）は、「われわれの非コリメート・ソーラシミュレータの多くはユーザーが出力密度と標的面積の調整に使う任意選択可変焦点アッセンブリつきで購入可能である。われわれの反射鏡だけを使った完全反射系はランプ光源からの6画像を重ね合わせることによって高い強度と均一な照明を作りだす。これが強度低下をもたらす拡散板を使ったシステムや色収差を導入するレンズベース系に勝る長所だ」と語っている。

LEDベースシミュレータとは

独バイエルン応用エネルギー研究センター（Bavarian Center of Applied Energy Research）と独エルランゲン-ニュールンベルグ大学（University of Erlangen-Nuremberg）の研究チームは改善されたスペクトルマッチング能力を持つLEDベースのソーラシミュレータを研究している[3]。残念なことに、多くのランプベースシミュレータはクラスAスペクトル合致度を達成するとはいえ、太陽スペクトルからの偏差は依然として大きく、特に、結晶シリコンがそのピークスペクトル応答を持つ800～1000nmのウィンドウで大きく逸脱する。プロトタイプLEDシミュレータは400～1100nm範囲の22種類の波長における700個の特別に設計された超高輝度LEDを使用している。予備的な結果から、それが首尾よくクラスAスペクトルマッチングによるAM1.5スペクトルのシミュレーションに成功し、定常状態とパルスモードのいずれでも動作し、ランプベースの同等品に比べて低い電力消費量と長い寿命を提供することが明らかになった。従来の技術にこだわるシミュレータメーカーは外を見るべきだ。LEDベースのソーラシミュレータの時代はすぐ近くに迫っているかもしれない。

参考文献

（1）K. Emery, "ASTM Photovoltaic Performance Standards," ASTM Standardization News, 30–33（July 2007）.

（2）M.K. Chawla, "A step by step guide to selecting the 'right' Solar Simulator for your solar cell testing application," Photo Emission Tech application note（2011）; www.photoemission.com/techpapers.

（3）T. Swonke and U. Hoyer, "Concept for a Real AM1.5 Simulator Bas ed on LED-Technology and Survey on Different Types of Solar Simulator," Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, Germany, session 4AV.3.24, 3377–3379（Sept. 21–25, 2009）.

LFWJ