

# LSC（蛍光形太陽光集光板）を用いた太陽エネルギーの波長別有効利用システムに関する研究（その1）

—LSC を用いた高効率光電変換デバイスの基礎特性—

羽 根 義  
(技術研究所)

## § 1. はじめに

太陽光による発電は、他の代替エネルギーに比べて、

- ・無尽蔵に利用し得る、無償のクリーンエネルギーである、
- ・光エネルギーを直接電気エネルギーに変換するため火力、原子力、風力発電のような可動部分がなく、無公害発電である、
- ・保守が容易で、自動化、無人化が容易である、
- ・必要な電力をその場で発電できるので、送電線の必要がないオンサイト発電装置である、
- ・太陽光発電は光さえ当たれば発電するので、屋根上などのデッドスペースを利用することができる、

等の利点があり、未来のエネルギー供給を支える重要なエネルギー源になりうると考えられている。しかし一方で、

- ・大電力を発電するには変換効率が低いので大面積が必要である、
- ・現時点では発電コストが高価である、

等の欠点もあり、特にコストの問題は太陽光発電の普及を大きく阻んでいるが、これらの問題解決のために変換効率の向上は重要な要素である。現在研究が行なわれている変換効率向上のための方法のなかで、特にスタックドセルによる波長感度範囲の拡大による高効率化は、太陽電池の効率を飛躍的に引き上げる画期的方法である。これは通常波長分割形太陽電池と呼ばれ、なかでも多層薄膜を同一基板上に形成するタンデムセルが注目されている。これは、理論変換効率が24%にも上るものであるが、良質の膜ができない等の理由であまり効率の良いものは得られていない。また、波長分割形太陽電池のもう一つの方法である波長分割形複数セル方式は28.5%の実験による効率を得られているが、コストの面であまり実用的でないといわれている。

そこで、筆者らは蛍光コレクタ (Luminescent Solar Concentrator; 以下、LSC と略す) に着目し、LSC の

種々の特性を調査し実験を行なった。LSCとは、透明な媒質に蛍光染料をドープしただけの構造的には非常に簡単な集光系で、非常に低コストで、かつ高効率の太陽光発電が可能になると考えられる。

本報告では、LSCの光学材料としてのユニークな特性、特に入射太陽光を分光し、波長変換し、2方向に分配し集光する機能を理論式を用いて展開する。また、新しい多端子タンデム形光電変換デバイスを提案し、これの一番基本的なシステムである4端子タンデム形光電変換デバイスについて、発電シミュレーションと発電試験をもとにLSCを用いた多端子タンデム形光電変換デバイスの有用性について述べる。

## § 2. LSC（蛍光コレクタ）の特性と既往の研究

### 2.1 LSC の特徴と研究開発状況

LSCとは、図-1に示すように透明媒質中に蛍光染料をドープしたもので、通常は平板状である。上面より入射した光は一部蛍光染料により吸収され、残りは下面へと透過する。染料に吸収された光は、ストークスシフト

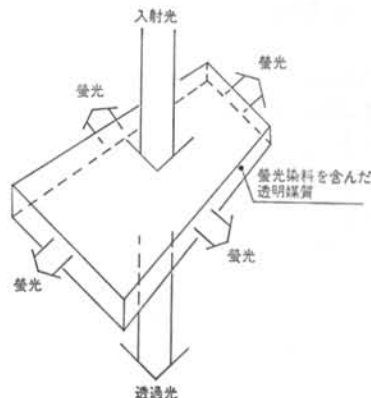


図-1 LSC の概要

によって入射光より長波長の光となって放射される。この光は透明媒質と空気との屈折率によって透明媒質中で端面へと向かい、ここから放射する。つまり、LSCは、

- ・染料に吸収された光と、されない光に分けられる(分割)、
- ・染料に吸収される光は特定波長帯域の光である(分光)、
- ・ストークスシフトにより、発光波長は吸収波長より長波長である(波長変換)、
- ・さらに、LSCの表面積を大きく取り、厚さを薄くすれば端面から集光した光が得られる(集光)、

等の特徴がある。この端面に光を集光する性質を利用して端面に太陽電池や集集体を設置し、追尾の必要のない集光器として使用する試みが多く研究されており、同時にLSCの改良も行なわれている<sup>1)2)</sup>。

### 2.1.1 LSC本体の研究の現状

LSCの材質自体の研究としては、大きく分けて有機系染料(母材としては多くがPMMA<sup>3)</sup>)と無機系染料(母材としては多くがガラス)を用いるものがある。有機系染料を用いたものは、無機系染料より蛍光量子効率が良いために、LSCとしての効率は無機系染料を用いたものより良いのが現状である。このため、太陽電池等と組み合わせられて研究されているのは大体が有機系染料である。しかし、有機系染料は光劣化の問題がある。一方、無機系染料は蛍光量子効率が低く、効率の良いLSCは製作されていないが光安定性は非常に良い。このように有機系、無機系ともに利点と欠点とがあり、それぞれ前者は光劣化、後者は蛍光量子効率の問題を中心に研究されている。また、最近では両者を組み合わせたものも研究が行なわれている。さらに、この他にLSCの構造の改良も考えられており、図-2のような透明PMMA板の上にLSCの薄膜状シートを乗せた構造のものも考えられている。これは、厚板形LSCに対して、

- ・蛍光染料が微量で済む、
- ・下の透明板にガラスが使える、
- ・染料間の非放射エネルギー変換(カスケードイング)を有効に行なえる、

等の利点がある。したがって、このようにLSC自体も定まった形態というものではなく、様々な研究開発が行なわれているのが現状である<sup>3)4)</sup>。

### 2.1.2 LSCの応用研究の現状

現在、LSCの研究は米国、西ドイツを始め日本など多くの国で行なわれているが、LSCの端面に太陽電池を設置する方式(太陽光発電への応用)のほとんどが図-3に示したような厚板形LSCを用いた構造で、理論変換効

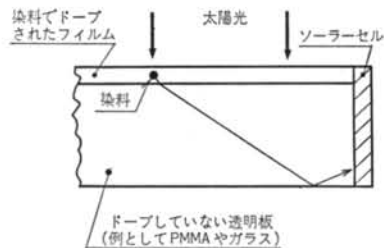


図-2 シート状LSCの概要

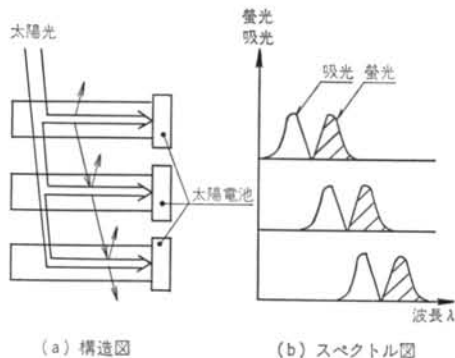


図-3 LSCの多層化の概要

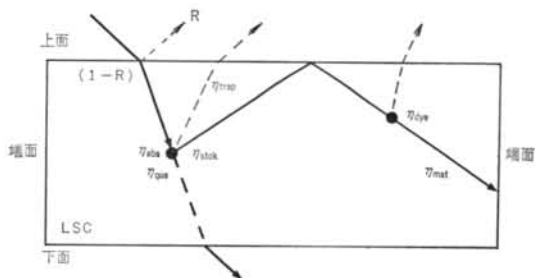


図-4 LSC中の光の挙動

率は32%と計算されている<sup>5)</sup>。しかし、実際の実験レベルで得られている変換効率は2~3%程度である。これは、

- ・染料の吸収帯域が狭い、
- ・ストークスシフトによるロスが大きい、
- ・染料による2次吸収が大きい、

等の理由による。そして、特に狭い染料の吸収帯域を広げるために図-3に示されるような多層化や複数染料の混合を行なうと、理論計算では無視していた上記ストークスロスと2次吸収ロスがますます大きくなり、無視できなくなるためである。また、これらを改善するため図-2に示したようなシート状LSCも研究されているが、実際の発電効率は太陽電池としてSi単結晶を用いて3.2%、GaAs太陽電池を用いて4.5%でしかない。このように、LSCの持つ多くの利点のために様々な応用研究が行なわれているが、まだまだLSCを利用した太陽エネル

ギー変換システムの効率は低い<sup>6)</sup>。

## 2.2 LSC の動作原理

LSCの集光, 分光, 波長変換の原理を説明するために代表的な厚板形 LSC を例にとって図-4に説明する。まず, LSC上面からの入射光はLSC表面でフレネル反射により一部反射し( $R$ ), 残り( $1-R$ )はLSC内部へと進入する。さらに, この光は一部染料に吸収され( $\eta_{abs}$ ), 残りはLSC下面へと透過して行く。染料に吸収された光は, ストークスシフトによるエネルギーロス ( $\eta_{stok}$ ) を経て蛍光として再発光する( $\eta_{qua}$ )。この再発光の一部はLSC上面と下面より外へ放射し, 残り ( $\eta_{trap}$ ) は空気と母材の屈折率により端面へと導かれる。この間に染料による蛍光の2次吸収( $\eta_{dye}$ ), 母材自体による吸収, 散乱損失 ( $\eta_{mat}$ ) が考えられる。したがって, ここでLSC上面に入射してくる全入射エネルギー  $Q_a$  とエッジから放射する全エネルギー  $Q_r$  との比をエッジエネルギー効率  $\eta_{opt}$  とすれば,

$$\eta_{opt} = Q_r / Q_a \quad \dots\dots(1)$$

$$\eta_{opt} = (1-R) \cdot \eta_{abs} \cdot \eta_{stok} \cdot \eta_{qua} \cdot \eta_{trap} \cdot \eta_{dye} \cdot \eta_{mat} \quad \dots\dots(2)$$

と表わすことができる。ただし,

$R$ : フレネルの反射率

$\eta_{abs}$ : 色素による吸収効率

$\eta_{stok}$ : ストークス効率, ( $1-\eta_{stok}$ ) はストークスシ

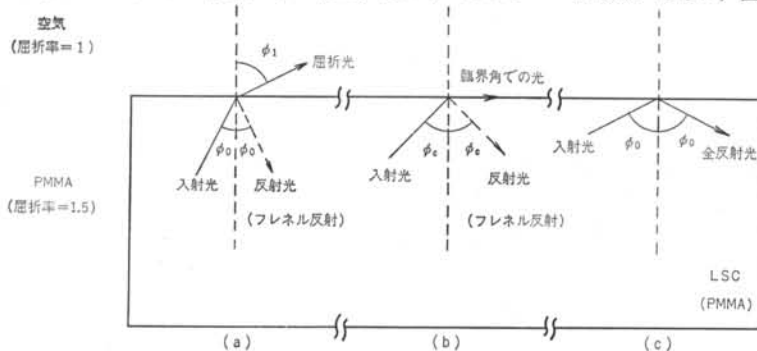


図-5 PMMAと空気界面における光の挙動

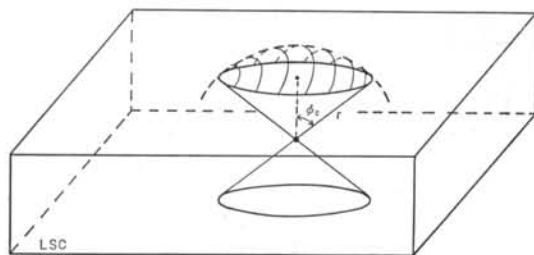


図-6 臨界角による円錐モデル

フトによるエネルギー損失

$\eta_{qua}$ : 色素の蛍光量子効率

$\eta_{trap}$ : 全反射によりLSC内部に捉えられる蛍光の割合

$\eta_{dye}$ : 非再吸収率, ( $1-\eta_{dye}$ ) は色素による2次吸収の率

$\eta_{mat}$ : 母材透過率, ( $1-\eta_{mat}$ ) は母材による光の吸収, 散乱損失

$\eta_{abs}$ ,  $\eta_{stok}$ ,  $\eta_{qua}$ ,  $\eta_{dye}$  は染料の種類に依存している。 $(1-R)$  はほぼ母材と空気の屈折率によってのみ決まり, 母材がPMMAの場合通常  $R \approx 0.04$  である。 $\eta_{trap}$  も母材と空気の屈折率のみによって決まり, LSCの大きさやその他には無関係である。ここで,  $\eta_{trap}$  を求めるためにまず透明媒質 (PMMA) と空気の界面における屈折について考える。図-5でスネルの法則 (Snell's Law) を考えると, 光は次式を満足する。

$$1.5 \cdot \sin \phi_0 = 1 \cdot \sin \phi_1 \quad \dots\dots(3)$$

入射角が小さいうちは図-5(a)のようになり, 次第に入射角を増すと図-5(b)のように光の入射角度  $\phi_0$  がある値  $\phi_c$  に近づくに従って屈折した光が二つの媒質の境界面に近づき,  $\phi_c$  に一致すると境界面に沿って光が伝播する。このとき, 入射角度が  $\phi_0 = \phi_c$  を臨界角 (Critical angle) といい,

$$\sin \phi_1 = 1 \quad \dots\dots(4)$$

となる。さらに, 図-5(c)のように臨界角以上に傾いた入射光はスネルの法則において  $\sin \phi_1$  の値が1以上になり,  $\phi_1$  が架空の値になる。すなわち,  $\phi_0 > \phi_c$  の場合には屈折がなくなり反射が起こることになる。この反射を全反射 (Total reflection) といい, 入射光はエネルギーロスなしに反射する。つまり,  $\phi_0 > \phi_c = 42^\circ$  の角度でLSC中から空気中へ向かう蛍光は, 界面で全反射しLSC端面へと向

かう。これを三次元で考えると, 図-6に示すように  $\phi_c$  によって表わされる円錐の外側へ再放射された光が内部反射することになる。再放射光は等方性であるので, 円錐と同じ半径の球の表面積と, そこからその円錐が切り取る表面積とを考えれば  $\eta_{trap}$  を求めることができる。円錐が切り取る表面積を  $A$  とすれば,

$$A = 2\pi r^2 (1 - \cos \phi_c) \quad \dots\dots(5)$$

したがって, LSC上面より光が漏れる可能性は  $A/4\pi r^2$  となる。下面から漏れる可能性も同様である。したがって,

$$\eta_{\text{trap}} = 1 - 2 \left\{ \frac{2 \pi r^2 (1 - \cos \phi_c)}{4 \pi r^2} \right\} = \cos \phi_c$$

$$\approx 0.75 \quad \dots\dots(6)$$

となる。すなわち、蛍光の75%が平板内に捉えられることになる。

### § 3. 代表的な厚板形 LSC の光特性

ここでは代表的な厚板形 LSC の光特性を測定し、光学的な特性を明らかにした。実際に実験に使用した LSC は板厚 10mm と 3mm で、80×80mm の正方形をしている (図-7)。母材は PMMA で、それぞれオキサジン系、黄色系、ローダミン系、赤色系と推定される染料でドーピングされている。

#### 3.1 Xe ランプによる透過特性の測定

LSC は太陽光を光源として用いるが、実際の太陽光は緯度や季節、天気や大気の状態によって変わり非常に不安定である。このため、通常太陽電池等の計測にはソーラーシミュレータや Xe ランプが用いられるのが一般的である。Xe ランプは非常に太陽光に近い分光特性を有し、これに AM (エアマス) フィルタ (Xe ランプの分光特性をより太陽光に近付けるフィルタ) を用いることによって擬似太陽光としている。したがって、本研究においても LSC にまず擬似太陽光を照射し、その吸収、透過特性を計測した。

##### 3.1.1 実験方法

測定ブロック図を図-8 に示す。まず、Xe ランプの光を AM 1.5 (我が国の太陽スペクトルに近いもの) のフィルタに通し、レンズにより集光し、コリメータに入力する。次に、コリメータによって得られた平行光線を

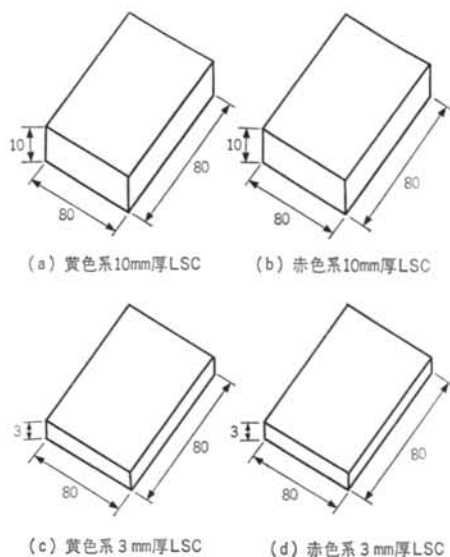


図-7 実験に使用した厚板形 LSC の外形図

LSC に透過させ、LSC が存在しない場合の出力電圧との比を 10nm ステップごとに 390~720nm の範囲で測定した<sup>9)</sup>。

##### 3.1.2 実験結果

黄色系 LSC の測定結果を図-9 に、赤色 LSC の測定結果を図-10 に示す。黄色、赤色ともに 10mm 厚 LSC よりも 3mm 厚 LSC の方が光を良く透過させる。また、10mm 厚、3mm 厚 LSC とともに赤色より黄色の方が光は良く透過する。各グラフとも長波長領域で 100% を越えているが、これは蛍光の一部が内部反射せず透過してきているためと考えられる。

#### 3.2 単色光による透過特性の測定

基本的な光学特性を計測するために、モノクロ(単色)光に対する吸収、透過特性を測定した。

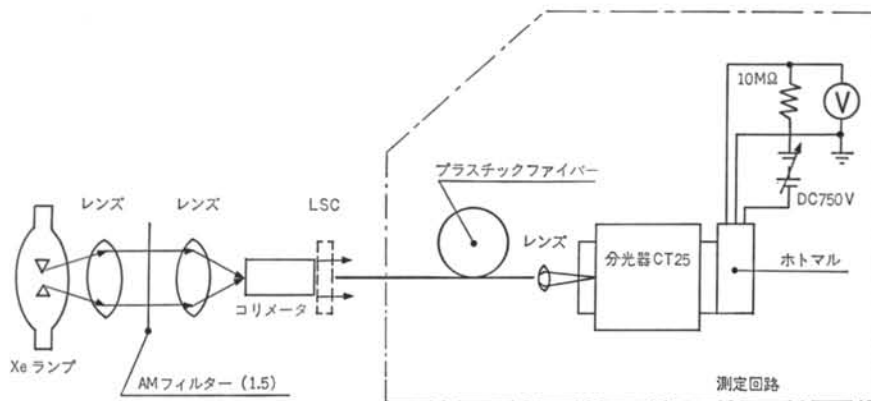


図-8 厚板形 LSC 透過特性測定図

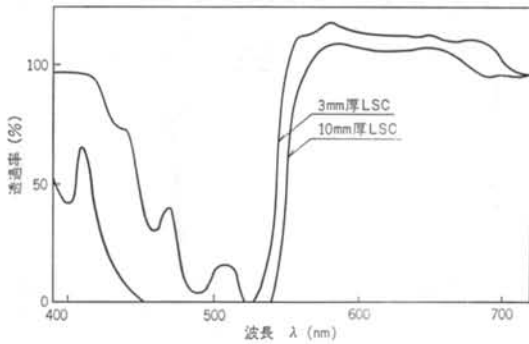


図-9 黄色系 LSC 透過特性

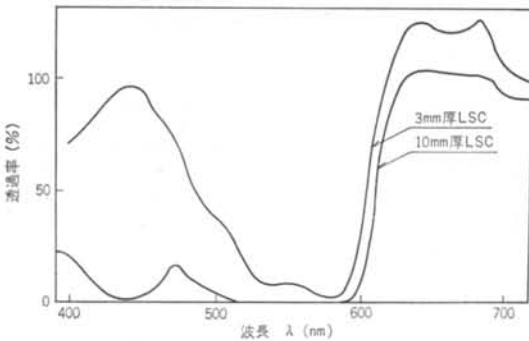


図-10 赤色系 LSC 透過特性

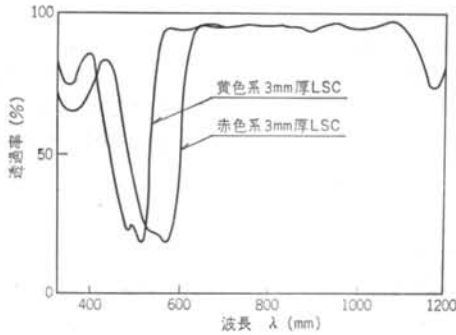


図-11 3mm厚 LSC の単色光透過特性

### 3.2.1 実験方法

図-7の(c)と(d)の LSC を用いて上面にモノクロ (単色) 光を照射し、下面から透過してくる光を計測することにより分光透過特性を計測した。測定は分光感度測定装置 (YQ-250) を用いて行ない、300~1200 nm の範囲で 10 nm ステップ毎に測定した。このときの単色光強度は  $27 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、半値巾は約 20 nm である。測定には、検出器として Cz-Si 太陽電池を使用している。

### 3.2.2 実験結果

黄色 3mm 厚 LSC と赤色 3mm 厚 LSC の測定結果を図-11に示す。黄色 LSC の最大吸収波長は 520~525 nm の間にある。また、赤色 LSC の最大吸収波長は

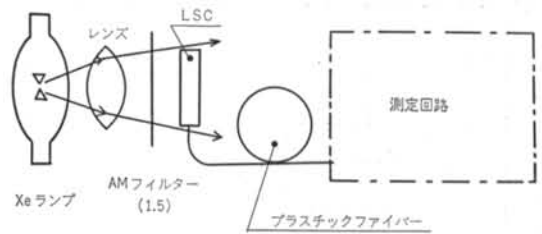


図-12 厚板形 LSC 端面光測定図

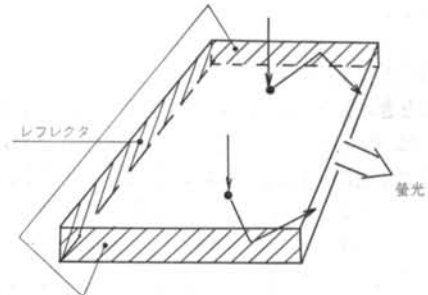


図-13 リフレクタを貼った 10mm 厚 LSC の概要

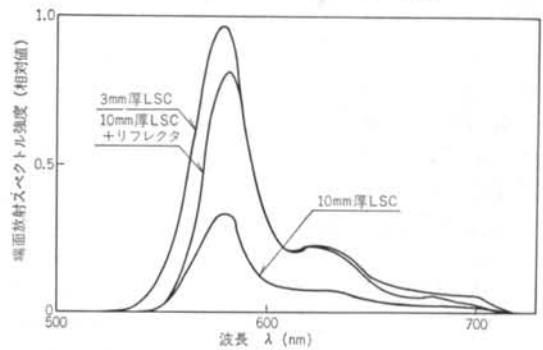


図-14 黄色系 LSC 端面光特性

575~580 nm の間にある。

## 3.3 Xe ランプによる端面光 (エッジ光) の測定

擬似太陽光を LSC 表面に照射した場合の端面 (エッジ) 光特性を測定した。

### 3.3.1 実験方法

蛍光コレクタの端面から放射する光を図-12のような方法で測定した<sup>10)~12)</sup>。コレクタ表面における測定時の Xe 光のエネルギー密度は  $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  である。また、図-13のように LSC の 3 端面にリフレクタ (3M 社製ペーパーミラー) を貼った場合について、10mm 厚の黄色と赤色の LSC について上の場合と同様に測定した。

### 3.3.2 実験結果

黄色系 LSC の端面光特性を図-14に、赤色系 LSC の端面光特性を図-15に示す。Y 軸は黄色 3mm 厚 LSC の端面放射出力 (分光エネルギー密度) のピーク値を 1

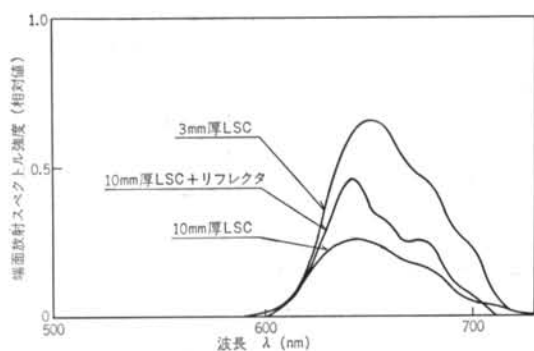


図-15 赤色系 LSC 端面光特性

としたときの相対値である。放射出力(分光エネルギー密度)は10mm厚LSCでは赤色は黄色の約1.2倍、3mm厚LSCでは逆に赤色が黄色の1.8倍の値が得られた。また、3mm厚LSCは10mm厚LSCに対して幾何学的集光比が3.3倍であるので放射出力(分光エネルギー密度)も理想的には3.3倍であるが、黄色で3倍、赤色で1.3倍であった。黄色LSCのピーク発光波長は578nm、赤色LSCのピーク発光波長は651nmであった。

また、リフレクタを貼った場合の端面光特性について、黄色10mm厚LSC+リフレクタの端面光特性を図-14に、赤色10mm厚LSC+リフレクタの端面光特性を図-15に示す。リフレクタがある場合、端面の放射面積が1/4になるので、理想的には放射出力(分光エネルギー密度)は4倍になるが、黄色10mm厚LSCで2.5倍、赤色10mm厚LSCで2.3倍となる。このことから、エネルギー効率(後述)を考えると集光比を上げるためには、この大きさではリフレクタを設置するより厚さを薄くした方が良いことが分かる。

### 3.4 屋外暴露(太陽光)による劣化特性の測定

有機染料を使用したLSCの課題の一つに光劣化の問題がある。ここでは実際のLSC(図-7(b))を屋外に暴露し、光劣化の様子を計測した。

#### 3.4.1 実験方法

図-7(b)のLSC(赤色系10mm厚LSC、母材はPMMA)を屋外に暴露し、一カ月毎に3.1と3.3の方法でそれぞれ透過特性と端面光特性を測定した。

#### 3.4.2 実験結果

透過特性劣化の様子を図-16に、また端面光特性劣化の様子をエッジエネルギー効率の値で表わし表-1に示す。図-16より、400~600nmの間ではほとんど劣化がみられない。これはつまり、 $\eta_{mat}$ や $\eta_{abs}$ などは光劣化の影響をあまり受けないことを意味している。一方、600~700nm辺りの値は時間とともに低下している。す

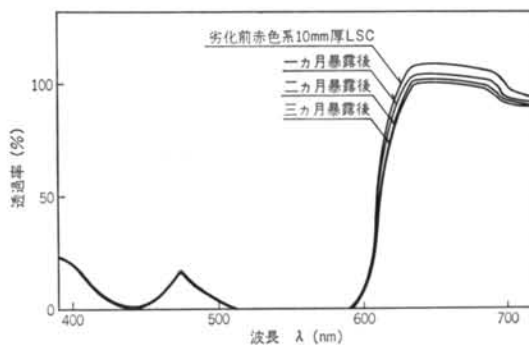


図-16 赤色10mm厚LSC透過率劣化特性

	一カ月目	二カ月目	三カ月目
$\eta_{opt}$ 低下率(%)	95.8	93.1	92.6

表-1 端面光劣化特性

LSC	C	$\eta_{opt}$ (%)	$\eta_{thro}$ (%)
黄色10mm厚	2	14	76.1
赤色10mm厚	2	17	64.2
黄色3mm厚	6.67	12.6	86.9
赤色3mm厚	6.67	6.8	80.7
黄色10mm厚+リフレクタ	8	8.8	—
赤色10mm厚+リフレクタ	8	9.8	—

(注) ただし、 $\eta_{thro}$ は400~1200nmの範囲で計算した。

表-2 LSCの光学的性能

なわち、 $\eta_{qua}$ が劣化したことを意味している。このことは表-1からも明かであり、 $\eta_{qua}$ の劣化が $\eta_{opt}$ (エッジエネルギー効率)の低下を引き起こしている。したがって、経時変化として問題になるのは染料の蛍光寿命であることが分かる。

### 3.5 考察

これらのデータをもとに、LSCの光学的特性を2.2で示した以外に以下のように定め、計算によって求めた。

幾何学的集光比をCとすると、

$$C = A_{face} / A_{edge} \quad \dots\dots(7)$$

$A_{face}$ : 太陽光が入射するLSC表面の広さ

$A_{edge}$ : 蛍光が放射するLSCエッジの面積

と表わせる。これは外形寸法より求まる。さらに、エネルギー透過率を $\eta_{thro}$ とすれば、

$$\eta_{thro} = Q_t / Q_a \quad \dots\dots(8)$$

$Q_t$ : LSC下面より透過してくる全エネルギー

$Q_a$ : LSC上面に入射する全エネルギー

と定義する。これら光学的性能を表-2に示した。

表-2より、入射した太陽光のうち、約70~80%を下に透過させ、約20~40%を吸収し、約10~20%(吸収した光のうち、50~70%)を端面から放射する。また、端

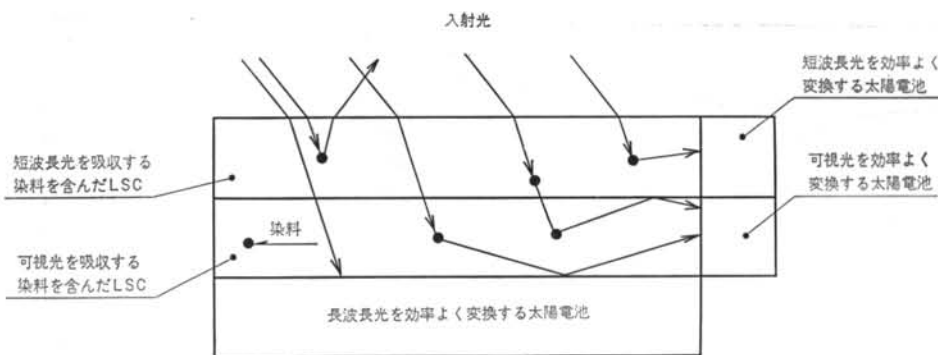


図-17 LSC を用いた新しい多端子タンデム形デバイス

面からの光は吸収された光に対して約50~70 nm 長波長側にシフトする。一方、幾何学的集光比の高いLSCを用いれば、つまり端面の面積に比べて表面の面積が十分に大きければ、端面におけるエネルギー集光比  $C_f$  は  $C_f = C \times \eta_{opt}$  で上げることができる。この理論的上限は、放射に関するプランクの式より熱力学的考察から、

$$C_f = \left( \frac{\nu_1}{\nu_2} \right)^2 \exp \frac{h(\nu_1 - \nu_2)}{KT} \quad \dots\dots(9)$$

- ただし、 $\nu_1$ : 吸収光周波数
- $\nu_2$ : 蛍光周波数
- $h$ : プランク定数
- $k$ : ボルツマン定数
- $T$ : 絶対温度

となる。この式より、例として  $\nu_1 = 6 \times 10^{14} \text{s}^{-1}$ ,  $\nu_2 = 5 \times 10^{14} \text{s}^{-1}$  (波長にすれば  $\lambda_1 = 500 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 600 \text{ nm}$ ),  $T = 300 \text{ K}$  について計算すると  $C_f \leq 6 \times 10^6$  となり、熱力学的には極めて大きな集光比が可能で、100倍程度の集光比は可能であると考えられる<sup>13)</sup>。

## § 4. 厚板形 LSC を用いたタンデム形光電変換デバイス

### 4.1 LSC を用いたタンデム形光電変換デバイスの特徴と位置付け

ここでは、LSC を用いた新しいタイプの波長分割形光電変換システム(図-17)について述べる。

まず、LSC 上面より入射した光は、1枚目のLSCにドーブされている紫色あたりを吸収する染料に吸収され、緑色より長波長の光は2枚目のLSCへと透過して行く。そして、2枚目のLSCにドーブされている緑色や黄色あたりを吸収する染料に吸収され、赤色より長波長の光はLSC下面の赤色や赤外を効率よく変換する太

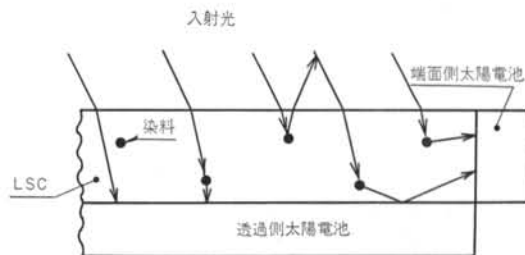


図-18 LSC を用いた4端子タンデム形光電変換デバイス

陽電池(例えば、Ge 半導体太陽電池)へと入射する。一方、1枚目のLSCの染料に吸収された光は端面に集光され、紫色の光を効率よく変換する太陽電池(例えば、バイオレットセルや2eVのバンドギャップをもつ合金半導体太陽電池)に入射する。また、2枚目のLSCの染料に吸収された光も端面に集光され、緑色や黄色の光を効率よく変換する太陽電池(例えば、GaAs系太陽電池や単結晶太陽電池)に入射する。したがって、太陽光を極めて効率よく電気に変換することができると思われる。この方式は、従来のタンデムセルに比べて利点として、

- ・太陽電池を別々に用いるので組み合わせ太陽電池に制限がない、
- ・端面側の光は集光されるので集光比が1のときに比べて端面側太陽電池の効率が上がる、
- ・現状の太陽電池を使用することができる、

また、従来の波長分割形複数セル方式に対しては利点として、

- ・端面側の太陽電池が非常に小さくできるのでコストが安い、
- ・導光装置(集光装置)がいらぬ、

等が考えられる。

### 4.2 厚板形 LSC を用いたタンデム形光電変換デバイス(4端子型)

ここでは新しいタイプの波長分割形太陽電池の光電変

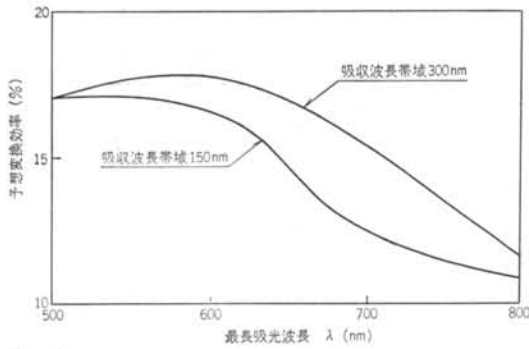


図-19 予想変換効率曲線

太陽電池	太陽電池出力(mW)	
	LSC下面に設置した場合	端面に設置した場合
a-Si	152.8	99.1
CdS	354.9	17.1
poly	623.1	102.5

表-3 黄色系 LSC を用いた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの出力シミュレーション

換効率を、図-18に示す最も基本的な 4 端子形について求める。端面側に変換効率 10%(AM 1.5)のアモルファスシリコン太陽電池を、透過光側に変換効率 14%(AM 1.5)の多結晶シリコン太陽電池を仮定した。

まず、図-18の上面に入射する光は一部(R)表面で反射し、残り(1-R)が透過してくる。ここでまた、一部( $\eta_{abs}(\lambda)$ )が染料に吸収され、残りがフレネル反射を経て下面へ透過して行く。染料に吸収された光は、蛍光( $\eta_{qua}$ )となって放射し、内部反射により端面へと向かう。したがって、端面の太陽電池から得られる電力を  $T_e$  とすれば、

$$T_e/P \doteq (1-R) \cdot \eta_{trap} \cdot \eta_{qua} \times \int \eta_{abs}(\lambda) \cdot \eta E_a(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots(10)$$

となる。一方、透過側太陽電池から得られる電力を  $T_t$  とすれば、

$$T_t/P \doteq (1-R)^2 \cdot \int (1-\eta_{abs}(\lambda)) \cdot \eta E_p(\lambda) d\lambda + (1-R) \cdot (1-\eta_{trap}) \cdot \eta_{qua} \times \int \eta_{abs}(\lambda) \cdot \eta E_p(\lambda) d\lambda \times 1/2 \quad \dots\dots(11)$$

となり、したがって両者合わせた変換効率は、 $\eta = (T_e + T_t)/P \quad \dots\dots(12)$

ここで、P: LSC に入射するエネルギー  
 $\eta E_a(\lambda)$ : 端面側太陽電池のモノクロ光に対する光電変換効率  
 $\eta E_p(\lambda)$ : 透過側太陽電池のモノクロ光に対する光電変換効率

である。式(11)の後半は蛍光が下面より漏れているためである。式(10)、(11)を使って求めた変換効率を図-19に示し

LSC下面に用いる太陽電池	LSC端面に用いる太陽電池	4端子デバイスとしての変換効率(%)
a-Si	a-Si	3.9
a-Si	CdS	2.7
a-Si	poly	4.0
CdS	a-Si	7.1
CdS	CdS	5.8
CdS	poly	7.1
poly	a-Si	11.3
poly	CdS	10.0
poly	poly	11.3

表-4 表-3より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

太陽電池	太陽電池出力(mW)	
	LSC下面に設置した場合	端面に設置した場合
a-Si	122.5	132.9
CdS	274.2	89.3
poly	552.6	165.8

表-5 赤色系 LSC を用いた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの出力シミュレーション

LSC下面に用いる太陽電池	LSC端面に用いる太陽電池	4端子デバイスとしての変換効率(%)
a-Si	a-Si	4.0
a-Si	CdS	3.3
a-Si	poly	4.5
CdS	a-Si	6.4
CdS	CdS	5.7
CdS	poly	6.9
poly	a-Si	10.7
poly	CdS	10.0
poly	poly	11.2

表-6 表-5より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

た。ただし、染料の吸収波長帯域が 150 nm と 300 nm の二つの場合について求め、染料の最長吸収波長をパラメータとして表わした。この場合、吸収波長帯域が 280 ~ 580 nm の染料をドープした LSC を使用した場合約 18%、同様に 390 ~ 540 nm の染料を用いた LSC 使用の場合約 17% の変換効率を得られることになる。

### 4.3 太陽電池を使用してのシミュレーション

4.2の理論に従って、LSC と太陽電池を使って 4 端子タンデム形光電変換デバイスの変換効率を求める実験を行なった。ここでは、実験に先だって式(10)と式(11)を使って発電量と変換効率についてシミュレーションを行なっ



た。デバイスの構造は図-18と同じである。LSCは黄色系、赤色系とも10mm厚のものを使用し、太陽電池は端面、透過側ともにアモルファスシリコン・CdS/CdTe（化合物）・多結晶太陽電池をそれぞれ使用したものとして計算した。これらの太陽電池のソーラーシミュレータ光に対する変換効率は表-7に示した。表-3、表-4に黄色系LSCを使用した場合のシミュレーション結果を示す。同様に、表-5、表-6に赤色系LSCを使用した場合のシミュレーション結果を示す。

## § 5. 厚板形 LSC を用いた 4 端子形光電変換デバイスの発電特性

### 5.1 ソーラーシミュレータによる発電試験

屋外太陽光は、色々な気象条件によって変化し一定ではないので、先ずソーラーシミュレータを使って発電実験を行なった。

#### 5.1.1 実験方法

LSC を用いた 4 端子形光電変換デバイス（図-18）の実際の効率測定は、図-20の構成で行なった。図-20(a)において LSC の大きさは  $80 \times 80 \times 100\text{mm}$  で、黄色系、赤色系ともに10mm厚のLSC（図-7）を用いた。端面と透過方向に使用した太陽電池はアモルファスシリコン、多結晶シリコン、化合物半導体（CdS/CdTe）太陽電池を各々用いた。各太陽電池は、各々端面の面積（ $80 \times 10\text{mm}$ ）、透過方向の面の面積（ $80 \times 80\text{mm}$ ）より小さいものを使用し、各々の面積分に換算して出力とした。

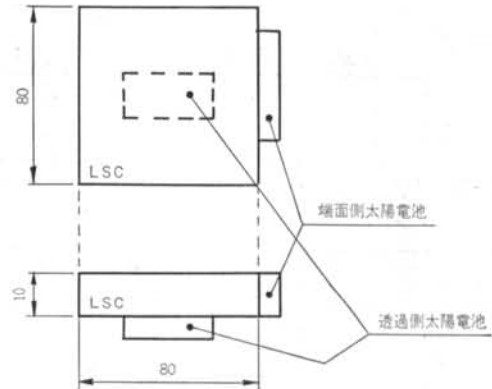
図-20(b)のソーラーシミュレータの出力は、グローバルで  $100\text{mW}/\text{cm}^2$ （単結晶シリコンにより校正）である。まず、各種太陽電池単体の効率を測定し、次に図-20(a)において黄色系と赤色系のLSCについて太陽電池を種類に変え、出力と変換効率を求めた。

	入力(mW)	出力(mW)	効率(%)
a-Si	—	293.6	4.59
poly-Si	6400	800	12.49
CdS	—	405.6	6.34

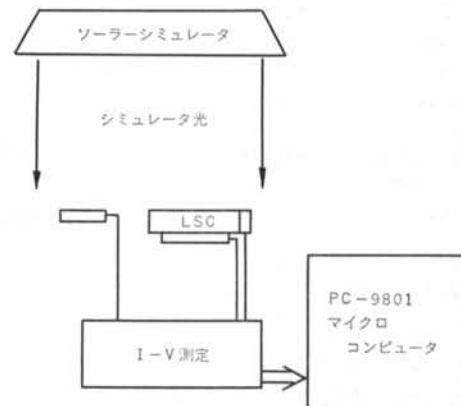
表-7 太陽電池の変換効率

太陽電池	太陽電池出力(mW)	
	LSC下面に設置した場合	端面に設置した場合
a-Si	152.4	56.1
CdS	378.4	70.7
poly	644.0	82.4

表-8 黄色系 LSC を用いた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの出力シミュレーション



(a) 実際のデバイス構成



(b) 測定概念図

図-20 ソーラーシミュレータによる発電特性測定図

### 5.1.2 実験結果

実験の測定に使用した各種太陽電池単体の変換効率を表-7に示す。照射エネルギーと出力の値は  $80 \times 80\text{mm}$  の広さに換算したものである。

LSC下面に用いる太陽電池	LSC端面に用いる太陽電池	4端子デバイスとしての変換効率(%)
a-Si	a-Si	3.3
a-Si	CdS	3.5
a-Si	poly	3.7
CdS	a-Si	6.8
CdS	CdS	7.0
CdS	poly	7.2
poly	a-Si	11.0
poly	CdS	11.2
poly	poly	11.4

表-9 表-8より求めた4端子タンデム形光電変換デバイスの効率

太陽電池	太陽電池出力(mW)	
	LSC下面に設置した場合	端面に設置した場合
a-Si	82.3	40.1
CdS	323.5	103.9
poly	558.8	116.2

表-10 赤色系 LSC を用いた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの出力

LSC下面に用いる太陽電池	LSC端面に用いる太陽電池	4 端子デバイスとしての変換効率 (%)
a-Si	a-Si	1.9
a-Si	CdS	2.9
a-Si	poly	3.1
CdS	a-Si	5.7
CdS	CdS	6.7
CdS	poly	6.9
poly	a-Si	9.4
poly	CdS	10.4
poly	poly	10.6

表-11 表-10より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

黄色系 LSC を用いた 4 端子形光電変換デバイスの効率の測定結果を表-8 に示す。同様に、赤色系 LSC の 4 端子形光電変換デバイスの効率の測定結果を表-9 に示す。出力値は、透過側は  $80 \times 80 \text{mm}$ 、端面側は  $10 \times 80 \times 4 \text{mm}$  の大きさに換算したものである。

表-7～表-11より、以下のことが分かった。

- 種々の太陽電池より効率が良い組合せは、黄色系 LSC を使用する場合は透過側に CdS/CdTe 太陽電池を使用し、端面側にアモルファスシリコンか、あるいは CdS/CdTe 太陽電池を使用する場合である。

- 赤色系 LSC を使用した場合は、透過側に CdS/CdTe 太陽電池を使用し、端面側にアモルファスシリコン太陽電池を使用した場合のみであった。

- 4.6%と6.3%の太陽電池を組み合わせることにより6.8%の効率が得られた。

- 同様に、6.3%の太陽電池を組み合わせることにより7.02%の効率が得られた。

- 赤色系よりも黄色系の方が効率がよい。

また、4.3のシミュレーションによる計算値と比較して、次のことが分かった。

- LSC 下面の太陽電池の発電量は、赤色系 LSC の下面に a-Si を用いた場合を除いて僅かに高めである。

- LSC 下面の太陽電池の発電量の計算値との違いは、およそ数%以内である。

- 端面側太陽電池の発電量は計算値と大きく異なっ

おり、特に a-Si と CdS/CdTe の値が異なる。

- a-Si は低め、CdS/CdTe は高めの値となっている。したがって、変換効率のずれの大きな原因は、端面側の a-Si と CdS/CdTe 太陽電池の発電量の違いであると考えられる。

## 5.2 屋外太陽光による発電試験

### 5.2.1 実験方法

実験は図-20(a)の構成で、5.1と同様に行なった。このときの天気は快晴で、全天日射のうち大半が直達日射であると思われる。測定時の太陽エネルギーの放射密度は、グローバル(全天日射)で  $65.1 \text{ mW/cm}^2$  であった。

### 5.2.2 実験結果

5.1.2 同様に各種太陽電池単体の変換効率を表-12に示した。シミュレーションの値やソーラーシミュレータを用いたときの実験値と比較するために、入射エネルギー密度を  $100 \text{ mW/cm}^2$  に換算して示した。また、照射エネルギーと出力の値は  $80 \times 80 \text{mm}$  の広さに換算したものである。

表-12～表-16を比較して、次のことが分かった。

- 組み合わせた各々の太陽電池より効率が良かった組合せは、黄色系 LSC を使用した方は、透過側に CdS/CdTe 太陽電池を使用し、端面側にアモルファスシリコンかあるいは CdS/CdTe 太陽電池を使用した場合である。

- 赤色系 LSC を使用した方は、透過側に CdS/CdTe 太陽電池を使用し、端面側にアモルファスシリコン太陽電池を使用した場合のみであった。

- 5.1%と6.8%の太陽電池を組み合わせると7.5%の効率が得られた。

- 同様に、6.8%の太陽電池を組み合わせると7.9%の効率が得られた。

- 赤色系よりも黄色系の方が効率がよい。

次に、透過側太陽電池の発電量をシミュレーションによる計算値と比較すると、

- CdS/CdTe 太陽電池の発電量が黄色系 LSC、赤色系 LSC の下面に用いた場合ともに計算値より高く、他の太陽電池の発電量は低い。

- 赤色系 LSC の下面にアモルファスシリコン太陽電池を用いた場合を除いて、計算値との誤差は10%前後である。

また、端面側太陽電池の発電量を同様に比較すると、

- 計算値とは10～83%と大きく異なっている。

- 特に、アモルファスシリコン太陽電池と CdS/CdTe 太陽電池の値が異なる。

	入力(mW)	出力(mW)	効 率(%)
a-Si	—	327.8	5.1
poly-Si	6400	738.8	11.5
CdS	—	438.0	6.8

表—12 太陽電池の変換効率

太陽電池	太陽電池出力(mW)	
	LSC下面に設置した場合	端面に設置した場合
a-Si	133.4	75.3
CdS	402.6	102.5
poly	570.2	114.4

表—13 黄色系 LSC を用いた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの出力

LSC下面に用いる太陽電池	LSC端面に用いる太陽電池	4 端子デバイスとしての 変換効率 (%)
a-Si	a-Si	3.3
a-Si	CdS	3.7
a-Si	poly	3.9
CdS	a-Si	7.5
CdS	CdS	7.9
CdS	poly	8.1
poly	a-Si	10.1
poly	CdS	10.5
poly	poly	10.7

表—14 表—8 より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

太陽電池	太陽電池出力(mW)	
	LSC下面に設置した場合	端面に設置した場合
a-Si	66.2	50.1
CdS	347.0	136.8
poly	498.1	140.3

表—15 赤色系 LSC を用いた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの出力

LSC下面に用いる太陽電池	LSC端面に用いる太陽電池	4 端子デバイスとしての 変換効率 (%)
a-Si	a-Si	1.8
a-Si	CdS	3.2
a-Si	poly	3.2
CdS	a-Si	6.2
CdS	CdS	7.6
CdS	poly	7.6
poly	a-Si	8.6
poly	CdS	9.9
poly	poly	10.0

表—16 表—10 より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

・アモルファスシリコン太陽電池は低め、CdS/CdTe 太陽電池は高めの値となっている。

・変換効率における計算値とのずれの大きな原因は、ソーラーシミュレータでの場合と同様に、端面側のアモルファスシリコン太陽電池と CdS/CdTe 太陽電池の発電量の違いである。

次に、ソーラーシミュレータにおける実験値に対して比較する。各種太陽電池の裸特性（太陽電池セル単体の特性）は、

- ・アモルファスシリコン太陽電池は10%高めである。
- ・CdS/CdTe 太陽電池は7.4%高めである。
- ・多結晶シリコン太陽電池は8%低めであった。

透過側太陽電池の発電量は、

- ・黄色系、赤色系 LSC の下面ともに CdS/CdTe 太陽電池が6%前後高めで、残りの場合は10~20%低めであった。
- ・端面側太陽電池の発電量は全体的に20~30%高めである。

### 5.3 考察

ソーラーシミュレータを使用して、4.6%のアモルファスシリコン太陽電池と6.3%の CdS/CdTe 太陽電池を使用して6.8%、6.3%の CdS/CdTe 太陽電池を組み合わせると7.0%の効率が、また屋外太陽光下で5.1%のアモルファスシリコン太陽電池と6.8%の CdS/CdTe 太陽電池を使用して7.5%、6.8%の CdS/CdTe 太陽電池を組み合わせると7.9%の効率が得られた。このことから、LSC と太陽電池を組み合わせれば従来のタンデム形セルと同様に高い変換効率を持つデバイスが作られ得ると考察される。そして、現在考えられている14%の変換効率を持つ多結晶シリコン太陽電池と10%の変換効率を持つアモルファスシリコン太陽電池を使用すれば、18%近い変換効率のデバイスが得られることが分かった。シミュレーションでは、組合せによって効率が向上するのは黄色系、赤色系ともに LSC の透過側に CdS/CdTe 太陽電池を、端面側にアモルファスシリコン太陽電池を使用した場合のみであったが、実験ではソーラーシミュレータや屋外太陽光による黄色系 LSC を使用した方は透過側に CdS/CdTe 太陽電池を使用して、端面側にアモルファスシリコン太陽電池かあるいは CdS/CdTe 太陽電池を使用した場合に効率が向上した。赤色系LSCを使用した方は、透過側にCdS/CdTe太陽電池を使用して、端面側にアモルファスシリコン太陽電池を使用した場合であった。また、ストークスシフトを無視した場合計算値よりも実験値の方が低くなるとは限らず、したがって

上記の組合せで18%以上になる可能性もある。例えば、450 nm の光は CdS/CdTe 太陽電池 ではほとんど電気に変えることはできないが、この光を黄色系 LSC によって吸光させ、ストークスシフトさせ発光させれば 580 nm 程度の光になる。この波長の光は、CdS/CdTe 太陽電池にとって十分電気に変換することができる。逆に、アモルファスシリコン太陽電池にとって 450 nm の光は最も効率よく電気に変換することができるが、580 nm の光では 450 nm のときの 8 割程度しか電気に変えることができないため、シミュレータによる実験値も屋外太陽光による実験値も計算値と異なった結果が得られた。特に、吸光発光波長あたりで分光感度特性に大きな変化を見せるアモルファスシリコン太陽電池と CdS/CdTe 太陽電池の値が大きく異なり、計算値に対してアモルファスシリコン太陽電池は低めの、CdS/CdTe 太陽電池は高めの実験値となった。次に、ソーラーシミュレータと実際の太陽光による発電量の違いであるが、これの最大の理由は裸特性（太陽電池セル単体の各々の発電量）の違いから、実験時の屋外太陽光はシミュレータの値に比較して短、中波長域にエネルギー成分が偏っていたものと思われる。

今回は一般的な LSC と太陽電池を使用したため、太陽電池の組合せや LSC の吸光、発光波長も必ずしもベストマッチングではない。例えば、多結晶シリコン太陽電池はどれと組み合わせても効率は向上しなかった。これは、320~500 nm の間のみアモルファスシリコン太陽電池の方が効率良く光を電気に変換することができるだけで、染料の吸光、発光波長とマッチングしていなかったためである。したがって、様々な吸光、発光波長を持つ染料でドープされた LSC を使用すれば、本実験に用いた太陽電池でもさらに効率が向上すると考えられる。

## § 6. 結論

本研究において、以下の事項が明らかになった。

### 6.1 厚板形 LSC について

- LSC は、大別して有機系染料と無機系染料を用いたものが有り、有機系染料は蛍光量子効率 ( $\eta_{\text{qua}}$ ) は高い (約 1.0) が光劣化が問題であり、一方無機系染料は光劣化の問題は無いが  $\eta_{\text{qua}}$  が低いという欠点がある。

- LSC は入射した太陽光のうち約 70~80% を下に透過させる ( $\eta_{\text{thro}}$ )。

- 約 20~40% を吸収する ( $\eta_{\text{abs}}$ )。

- 染料の吸収波長は 150 nm 位である。
- 約 10~20% を端面から放射する ( $\eta_{\text{opt}}$ )。
- 蛍光はストークスシフトによって約 50~70 nm 長波長側にシフトする。

- エネルギー集光比  $C_f$  の熱力学的限界は  $10^6$  位であるが、実際には 100 倍程度まで可能であると考えられる。

- $C_f$  を上げるには、端面にミラー (リフレクタ) を設けるより厚さを薄くする方が効率がよい。

- LSC の特徴を利用してソーラーセルと組み合わせたものはあるが、理論変換効率 32% に対して 2~3% の実験値しか得られていない。

- LSC の  $\eta_{\text{opt}}$  を低くしている原因の主なもの  $\eta_{\text{abs}}$  (0.2~0.4),  $\eta_{\text{stok}}$  (0.75),  $\eta_{\text{dye}}$  (0.75) であり、したがって通常  $\eta_{\text{opt}}$  は 0.2~0.4 程度である。

- LSC の屋外暴露による光劣化は染料の劣化 ( $\eta_{\text{qua}}$ ) が主因で、母材はほとんど劣化しない。したがって、 $\eta_{\text{thro}}$  は経時変化をあまり受けず、 $\eta_{\text{opt}}$  は染料の  $\eta_{\text{qua}}$  の劣化に比例する。

このことから、LSC が光学材料として他に類を見ない特性を持っており、有効に利用すれば新しい導光、集光装置として使えるであろうと推測できる。

### 6.2 LSC を用いたタンデム形光電変換デバイスについて

本研究に示した多端子タンデム形光電変換デバイスは従来の波長分割形太陽電池に比べて、タンデムセルに対しては、

- 太陽電池を別々に用いるので、組み合わせず太陽電池に制限がない。

- 端面側の光は集光されるので、集光比が 1 のときに比べて端面側太陽電池の効率が上がる。

- 現状の太陽電池を使用できる。

- 個々の太陽電池の分光感度域を狭く効率良く設計すれば、より高効率を得られる。このときに隣の膜との相性を考えなくてよい、

の利点があり、波長分割形複数セル方式に対しては、

- 端面側の太陽電池が非常に小さくできるのでコストが安い、

- 導光 (集光) 装置がいらない、

の利点がある。この多端子タンデム形デバイスの最も基本的な構造である 4 端子形について、発電の計算と実験を行なった。この結果、本システム (デバイス) が効率の向上に有効であることが分かった。つまり、LSC と太陽電池を本デバイスのように組み合わせ、光特性のマッチングが良ければ各々の太陽電池より良い効率が得ら

れるという結論が導びかれた。例えば、ソーラーシミュレータを使用して4.6%のアモルファスシリコン太陽電池と6.3%のCdS/CdTe太陽電池を使用して6.8%の変換効率が、6.3%のCdS/CdTe太陽電池を組み合わせると7.0%の変換効率が得られた。また、屋外太陽光下で5.1%のアモルファスシリコン太陽電池と6.8%のCdS/CdTe太陽電池を使用して7.5%の変換効率が、6.8%のCdS/CdTe太陽電池を組み合わせると7.9%の変換効率が得られた。

さらに、実験値とシミュレーションによる計算値を比較して透過側の出力はほぼ計算値どおりであったが、端面側はストークスシフトの影響によって大きく異なった。この点を改良すれば、提案されたモデルと計算式はより実用的となると考えられる。

また、この式を用いて理想的な場合を計算した結果、変換効率14%の多結晶シリコン太陽電池を透過側に使用し、10%のアモルファスシリコン太陽電池を端面側に使用した4端子形デバイスで18%以上の変換効率を期待できることが考えられる。

謝辞 本研究は、東京農工大学工学部電気工学科堀米孝教授のご指導のもとに、同大学院前島正裕君および三井東圧株式会社との共同研究として進められた。本研究成果をまとめるに当たり、これらの方々に深く謝意を表します。また、多方面にわたり快く協力して下さった機械電子検査検定協会、試料を提供して頂いた富士電気総合研究所(株)、松下電池(株)、シャープ(株)の各社に併せて謝意を表します。

#### <参考文献>

- 1) 例えば, W. Stahl et al.: "Thermal Conversion with Fluorescent Concentrators" Solar Energy, Vol.36, No.1 (1986) pp.27~35
- 2) 例えば, A. Zastrow et al.: "On the Conversion of Solar Radiation with Fluorescent Planar Concentrators (FPCs)" Proc. 3rd EC Photovoltaic Solar Energy Conf., Cannes (1981) pp.413~417, pp.389~411
- 3) 村橋俊介ほか編: "プラスチックハンドブック" 朝倉書店 (1979年) pp.893~411
- 4) A.M. Hermann "Luminescent Solar Concentrators-a Review" Solar Energy, Vol.29, No.4 (1982) pp.323~329
- 5) A. Goetzberger & V. Wittwer.: "Fluorescent Planar Collector Concentrators; a Review" Solar Cells, Vol.4 (1981) pp.3~23
- 6) 作田宏一: "けい光体による太陽光集光系" 電子技術総合研究所所報 Vol.50, No.8 (1986) pp.787~796
- 7) 伊藤公正編: "プラスチックデータハンドブック" 工業調査会 (1980年)
- 8) A. Wittwer et al.: "Efficiency and Stability of Experimental Fluorescent Planar Concentrators (FPCs)" Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., (1980) pp.760~764
- 9) 電気学会通信教育会編: "証明工学" 電気学会 (1964年) pp.140~151
- 10) 有機合成化学協会編: "染料便覧" 丸善 (1970年) pp.25~29
- 11) 久保田広ほか編: "光学技術ハンドブック" 朝倉書店 (1970年) pp.369~372
- 12) 田幸敏治ほか編: "光学的測定ハンドブック" 朝倉書店 (1981年) pp.340~367
- 13) 作田宏一: "けい光体による太陽光集光系" 電子技術総合研究所所報 Vol.50, No.8 (1986年) pp.787~796

