

LSC を用いた太陽エネルギーのタンデム形 光電変換デバイス

前島正裕¹・羽根 義²・巻口 浩³・堀米 孝⁴

¹ 国立科学博物館理工学研究部

² 清水建設技術研究所研究部・企画部

³ 三井東圧化学機能性ポリマー事業部

⁴ 東京農工大学工学部電気工学科

Tandem type photovoltaic device of solar energy with LSC

By

**Masahiro MAEJIMA¹, Tadasi HANE², Hiroshi MAKIGUCHI³,
and Takasi HORIGOME⁴**

¹ Department of Science and Engineering, National Science Museum, Tokyo

² Institute of Technology Simizu Construction Co., Ltd.

³ Mitsui Toatsu Chemicals, Inc.

⁴ Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

Abstract

LSC (Luminescent Solar Concentrator) is a flat plate of transparent material doped with a fluorescent dye. This material has functions of concentrator, wavelength-transformer and divider of sun lights. In this paper, unique properties of LSC as an optical material are studied, and a new multi-terminal tandem type photovoltaic device with LSC based on this characteristics is presented. Then power conversion efficiency are tentatively obtained through calculate and experiment with a test device, which is a new 4-terminal tandem type photovoltaic device of its simple model with a ready-made solar cells. As a result, usefulness of tandem type photovoltaic device with LSC is shown.

1. はじめに

増大するエネルギー需要に備え、また化石燃料からの脱却のために、自然エネルギーの利用は大きな課題である。この中でも特に太陽光発電にはいろいろな利点があり、未来のエネルギー源として極めて有望である。しかし、光のあたっている時のみ発電する、大電力を発電するには大面積が必要である、発電コストが高い等の問題が普及を大きく阻んでいる。これらの問題を解決するためには、変換効率の向上が鍵である。現在その為の色々な方法が研究されているが、この中でも特に「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方法であ

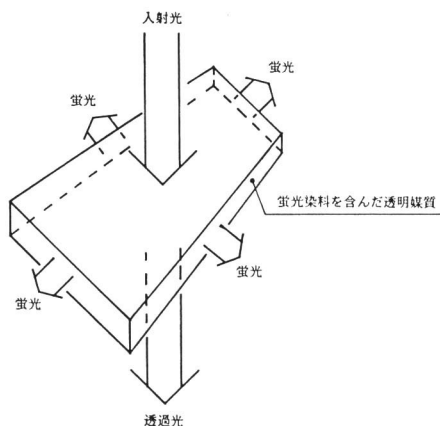


図 1-1 LSC

る。これは通常波長分割形太陽電池と呼ばれ、中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% にものぼるものであるが、現在の所、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。一方、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% もの実験による効率が得られているがコストの面であまり実用的でない。

そこで本研究では、第 3 の方法として、最近固定集光器として注目を集めている蛍光コレクタ (Luminescent Solar Concentrator, LSC と略す) に着目し、まず LSC の種々の特性を調査し実験をおこなった。LSC とは、図 1-1 のような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ある。この結果、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、集光する機能を明らかにした。そして、それを基に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行った。この結果から、4 端子タンデム形の場合で 18% 程度の変換効率が予想され、LSC を用いた多端子タンデム形光電変換デバイスの有効性を示した。

2. LSC (蛍光コレクタ)

ここでは LSC とは何か、つまりどのような光特性を示し、どのような特徴を持ち、なぜ注目されているのか、今どのような研究がなされているのかを述べる。

2-1 LSC の動作原理と特徴

LSC とは、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。この新しい光学材料の集光、波長変換の原理を説明するために代表的な厚板形 LSC を例にとって説明した。

まず図 2-1 で LSC 上面から来る光は LSC 表面でフレネル反射により一部反射 (R) し、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 (γ_{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 (γ_{stok}) をへて、より長波長の光が蛍光として再発光する (γ_{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 (γ_{trap})

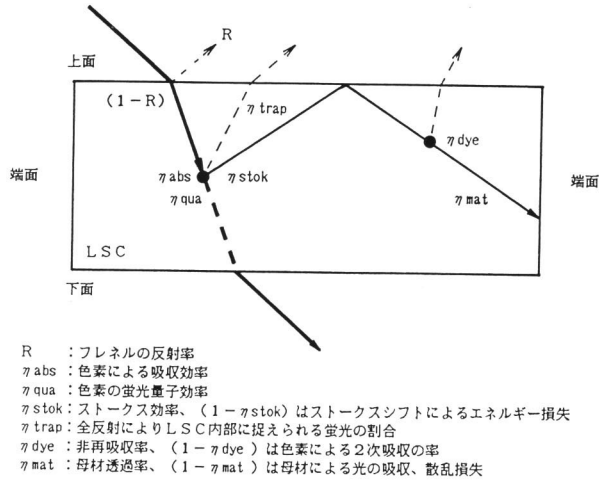


図 2-1 LSC 中の光

は空気と母材の屈折率により端面へと導される。このあいだに染料による蛍光の 2 次吸収 (η_{dye}) と、母材自体による吸収、散乱損失 (η_{mat}) が考えられる。従って、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 η_{opt} とすれば

$$\eta_{opt} = Q_r / Q_a \quad (2.1)$$

$$\eta_{opt} = (1 - R) \cdot \eta_{abs} \cdot \eta_{stok} \cdot \eta_{qua} \cdot \eta_{trap} \cdot \eta_{dye} \cdot \eta_{mat} \quad (2.2)$$

と表すことができる。ただし

- R : フレネルの反射率
- η_{abs} : 色素による吸収効率
- η_{stok} : ストークス効率、 $(1 - \eta_{stok})$ はストークスシフトによるエネルギー損失
- η_{qua} : 色素の蛍光量子効率
- η_{trap} : 全反射により LSC 内部に捉えられる蛍光の割合
- η_{dye} : 非再吸収率、 $(1 - \eta_{dye})$ は色素による 2 次吸収の率
- η_{mat} : 母材透過率、 $(1 - \eta_{mat})$ は母材による光の吸収、散乱損失

η_{abs} , η_{stok} , η_{qua} , η_{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。¹⁾ η_{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 η_{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 2-2 でスネルの法則 (Snell's law) を考えると光は次式を満足する。

$$1.5 \cdot \sin \phi_0 = 1 \cdot \sin \phi_1 \quad (2.3)$$

入射角が小さい内は図 2-2 (a) のようになり、次第に入射角を増して行くと、図 2-2 (b) のように光の入射角度 ϕ_0 がある値 ϕ_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、 ϕ_c に一致すると境界面に沿って光が伝播する。この時入射角度 $\phi_0 = \phi_c$ を臨界角 (Critical angle) といい、

$$\sin \phi_1 = 1 \quad (2.4)$$

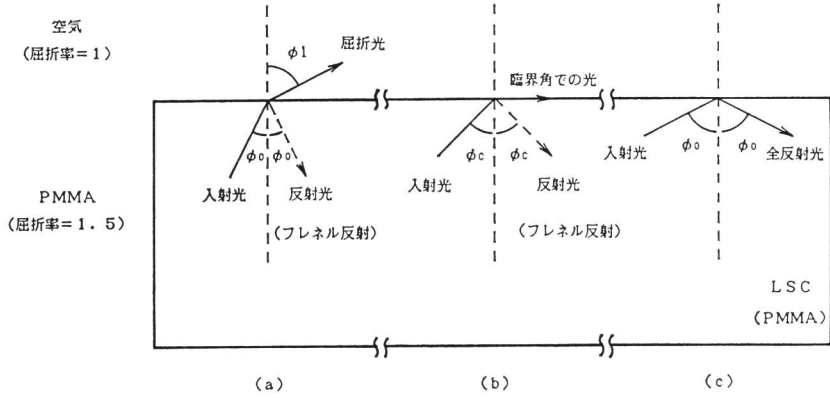


図 2.2 PMMA と空気界面における光の挙動

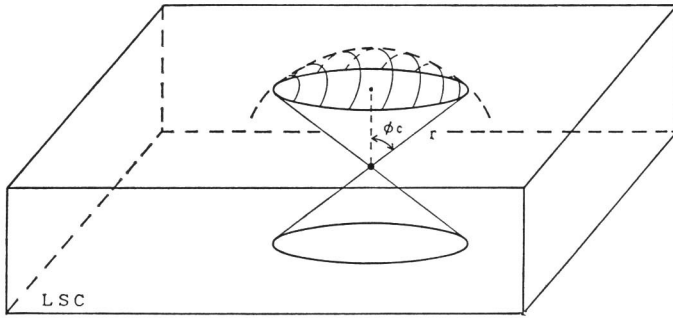


図 2.3 臨界角による円錐

となる．さらに図 2.2 (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於て， $\sin \phi_1$ の値が 1 以上になり， ϕ_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 中から空气中へ向かう蛍光は，界面で全反射し LSC 端面へと向かう．これを 3 次元で考えると図 2.3 に示すように， ϕ_c によって表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， η_{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

$$A = 2\pi r^2 (1 - \cos \phi_c) \quad (2.5)$$

従って 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．従って

$$\begin{aligned} \eta_{\text{trap}} &= 1 - 2 \left\{ \frac{2\pi r^2 (1 - \cos \phi_c)}{4\pi r^2} \right\} \\ &= \cos \phi_c \\ &\doteq 0.75 \end{aligned} \quad (2.6)$$

表 2.1 代表的な LSC の諸定数

| 諸定数 | 一般的な LSC の値 |
|----------------------|-------------|
| $1-R$ | 0.96 |
| η_{abs} | 0.2~0.4 |
| η_{stok} | 0.75 |
| η_{qua} | 0.95~1.0 |
| η_{trap} | 0.75 |
| η_{dye} | 0.75 |
| η_{mat} | 0.9 |
| η_{opt} | 0.07~0.15 |

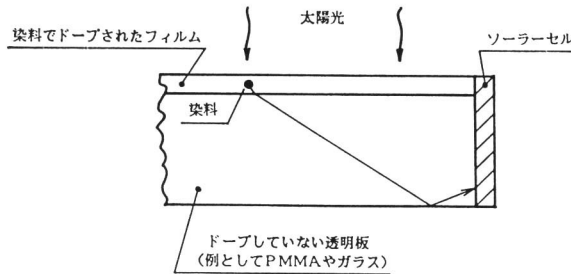


図 2.4 シート状 LSC

となる．つまり蛍光の 75% が平板内に捉えられるわけである．例として，現在一般的に用いられているレーザー染料による LSC の諸定数を表 2.1 に示した.²⁾ これらの内 $1-R$ と η_{trap} の値は母材に PMMA を使う限り一定の値である． η_{mat} も LSC の大きさに影響を受ける値であるがほぼ一定である．残りが染料により左右される値で特に η_{abs} と η_{dye} の影響が大きい．

ここで，もう一度 LSC について簡単にまとめると，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して行く．染料に吸収された光はストークスシフトと呼ばれるエネルギーロスを経て，元の光より長い波長の（エネルギーの低い）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，透明媒質中を端面へと向い，ここから放射する．つまり

- ・染料に吸収される光とされない光に分けられる．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）

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熱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 の改良も行われている.^{3,4)}

2.2 研究開発状況

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）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．PMMA とはポリメチルメタクリレートのことである．通常はメタクリル樹脂或はアクリル樹脂と呼ばれている.⁵⁾ 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よいために，今の所 LSC としての効率は無機系染料を用いたものより良い．

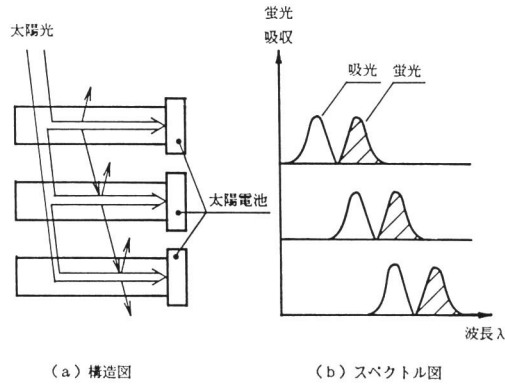


図 2.5 LSC の多層化

この為、太陽電池等と組み合わせ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、無機系共に利点と欠点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のレポートや LSC の構造自体の改良も考えられており、図 2.4 の様な透明 PMMA 板の上に LSC の薄膜状シートを乗せた構造のものもある。これは厚板形 LSC に対して、

- ・ 蛍光染料が微量ですむ
- ・ 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 (カスケードニング) を有効に行える

等の利点がある。このように LSC 自体もまだ定まった形というものではなく色々研究開発が行われている最中である。

現在 LSC の太陽光発電への応用研究は米国、西ドイツを始め日本など多くの国で行われているが、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) は大体が図 2.5 に示したような厚板形 LSC を用いた構造で、理論変換効率は 32% と計算されている。⁷⁾ しかし、現在の所、実際に実験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
- ・ 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 2.5 の様な多層化や複数染料の混合を行うと、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からである。またこれらを改善するため図 2.4 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。この様に LSC の持つ多くの利点の為に色々な応用研究が行われているが、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。⁸⁾

3. 代表的な厚板形 LSC の光特性

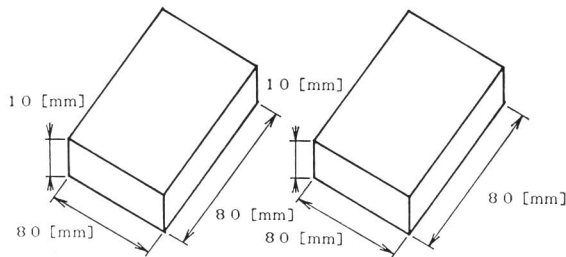
ここでは実際に代表的な厚板形 LSC の分光特性を測定し、光学的な特性を明らかにする。実験に使用した LSC は板厚 10 mm と 3 mm で、80×80 mm の正方形である (図 3・1)。母材は PMMA (ポリメチルメタクリレート) でそれぞれオキサジン系 (黄色), ロードミン系 (赤色) と推定される染料でドーピングされている。

3・1 Xe ランプ (疑似太陽光) による透過特性の測定

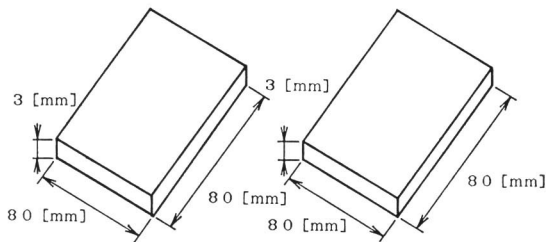
LSC は太陽光を光源として用いるのであるが、実際の太陽光は緯度や季節、天気や大気の状態によって変わり、非常に不安定である。この為、通常太陽電池等の計測にはソーラーシミュレータや Xe ランプが用いられる。Xe ランプは太陽光に近い分光特性をしており、これに AM (エアマス) フィルタ (Xe ランプの分光特性をより太陽光に近付けるフィルタ) を用いることによって疑似太陽光としている。⁹⁻¹¹⁾ したがって、LSC にまず疑似太陽光を照射し、その吸収、透過特性を計測した。

測定図を図 3・2 に示す。まず Xe ランプの光を AM 1.5 (だいたい日本あたりの太陽スペクトル) のフィルターに通し、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 LSC に透過させ、LSC が存在しない場合の出力電圧との比を 10 nm ステップごとに 390~720 nm の範囲で測定した。

透過率を百分率であらわし、黄色系 LSC の測定結果を図 3・3 に、赤色系 LSC の測定結果を図 3・4 に示した。黄色、赤色共に 10 mm 厚 LSC よりも 3 mm 厚 LSC の方が光を良く透過させる。



(a) 黄色系 10 [mm] 厚 LSC (b) 赤色系 10 [mm] 厚 LSC



(c) 黄色系 3 [mm] 厚 LSC (d) 赤色系 3 [mm] 厚 LSC

図 3・1 実験に使用した厚板形 LSC の外形図

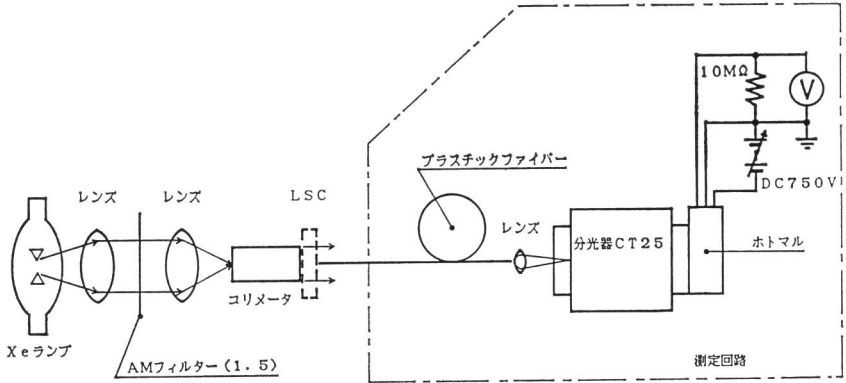


図 3.2 厚板形 LSC 透過特性測定図

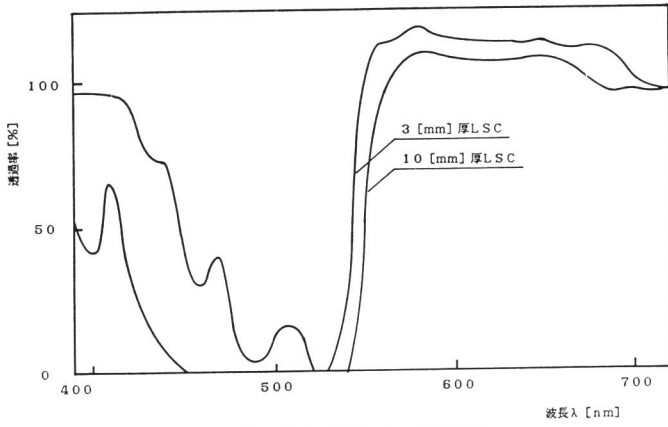


図 3.3 黄色系 LSC 透過特性

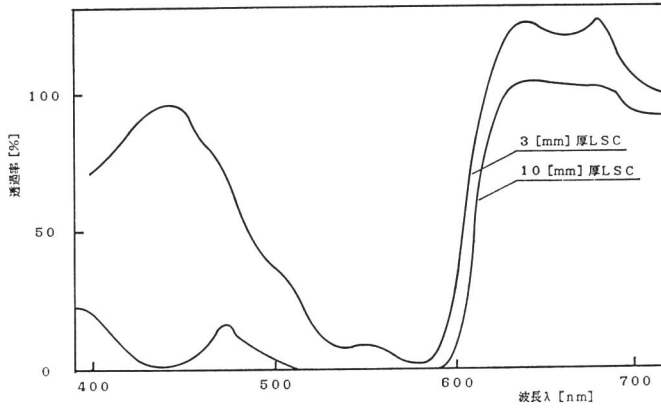


図 3.4 赤色系 LSC 透過特性

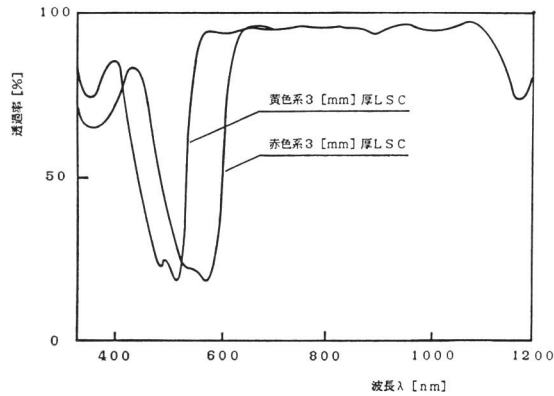


図 3.5 3 mm 厚 LSC の単色光透過特性

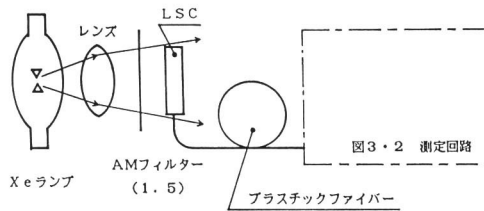


図 3.6 厚板形 LSC 端面光測定図

また、10 mm 厚、3 mm 厚 LSC 共に、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% を越えている部分があるが、これは蛍光の一部が内部反射せず透過して、染料に吸収されなかつた光に重畳している為と思われる。

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、透過特性をも調べた。図 3.1 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。実際の測定は分光感度測定装置 (YQ-250) を用いて行い、300~1200 nm の範囲で 10 nm ステップ毎に測定した。この時の単色光強度は $27 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、半値幅は約 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。

透過率を百分率であらわし、黄色 3 mm 厚 LSC と赤色 3 mm 厚 LSC の測定結果を図 3.5 に示した。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 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

疑似太陽光を LSC 表面に照射した場合の端面（エッジ）光特性を図 3.6 のような方法で測定した。なお、測定装置は事前に基準太陽電池（絶対値校正された単結晶太陽電池）を使用して絶対値校正した。¹²⁻¹⁴⁾ 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 $5 \text{mW}/\text{cm}^2$ である。また図 3.7 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 10 mm 厚の

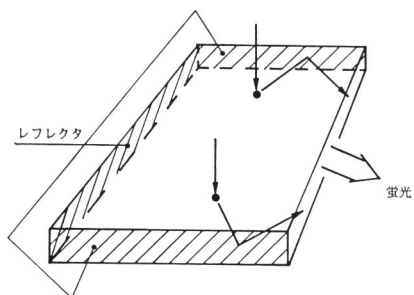


図 3.7 リフレクタを貰った 10 mm 厚 LSC

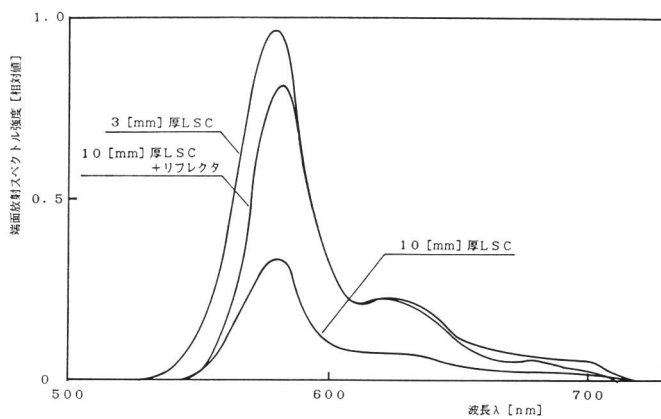


図 3.8 黄色系 LSC 端面光特性

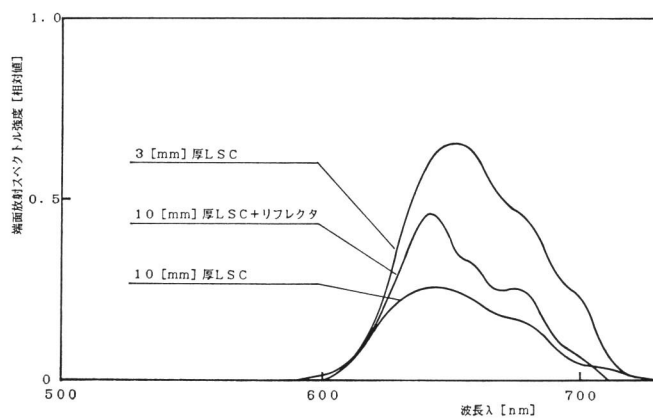


図 3.9 赤色系 LSC 端面光特性

黄色と赤色の LSC について上の場合と同様に測定した。黄色系 LSC の端面光特性を図 3・8 に、赤色系 LSC の端面光特性を図 3・9 に示した。Y 軸は黄色 3 mm 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 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 10 mm 厚 LSC では、赤色は黄色の約 1.2 倍。3 mm 厚 LSC では、逆に赤色が黄色の 1.8 倍であつた。また 3 mm 厚 LSC は 10 mm 厚 LSC に対して幾何学的集光比 (後述) が 3.3 倍である為に、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 578 nm, 赤色 LSC のピーク発光波長は 651 nm 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 10 mm 厚 LSC+リフレクタの端面光特性を図 3・8 に、赤色 10 mm 厚 LSC+リフレクタの端面光特性を図 3・9 の各グラフと一緒に示した。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 10 mm 厚 LSC で 2.5 倍、赤色 10 mm 厚 LSC で 2.3 倍であった。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為には、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わかる。

3・4 考察 (LSC の光学的特性)

以上 3・1~3・3 節の実験データを元に、LSC の光学的性能を 2・1 節で示した以外に以下のように定め、計算によって求めた。この値は 4 章のシミュレーションに使用する。

まず他の太陽光集光器と同様に幾何学的集光比を求めた。

・幾何学的集光比

幾何学的集光比を C とすると

$$C = A_{\text{face}} / A_{\text{edge}} \quad (3.1)$$

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

と表せる。これは外形寸法より求める。さらにエネルギー透過率を η_{thro} とすれば

$$\eta_{\text{thro}} = Q_t / Q_a \quad (3.2)$$

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 3・1 に示した。これらのことから 8 cm 角の LSC において、

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

表 3・1 LSC の光学的性能

| LSC | C | η_{opt} [%] | η_{thro} [%] |
|------------------|------|-------------------------|--------------------------|
| 黄色 10 mm 厚 | 2 | 14 | 76.1 |
| 赤色 10 mm 厚 | 2 | 17 | 64.2 |
| 黄色 3 mm 厚 | 6.67 | 12.6 | 86.9 |
| 赤色 3 mm 厚 | 6.67 | 6.8 | 80.7 |
| 黄色 10 mm 厚+リフレクタ | 8 | 8.8 | — |
| 赤色 10 mm 厚+リフレクタ | 8 | 9.8 | — |

η_{thro} [%] は 400~1200 nm の範囲で計算した。この波長帯には太陽光エネルギーの 82% が含まれ、本研究で使用した太陽電池の分光感度帯域もこの範囲である。

- ・端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。
- ・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 $C_f = C \times \eta_{opt}$ で上げることが出来る。

ここで集光比の理論的な上限を求めると、放射に関するプランクの式より熱力学的考察から、

$$C_f \leq \left(\frac{\nu_2}{\nu_1} \right)^2 \exp \frac{h(\nu_1 - \nu_2)}{kT} \quad (3.3)$$

ただし ν_1 : 吸収光周波数

ν_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

である。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 $C_f \leq 6 \times 10^8$ となり熱力学的には極めて大きな集光比が可能である。現実にはいろいろな損失の為にこれより小さいが、100 倍程度の集光比は可能であると思われる。¹⁵⁾ 従って、LSC を太陽電池の光コレクタとして用いれば、他の集光装置に対して

- ・追尾の必要がなく
- ・低コストで
- ・直達光でも散乱光でも集光し
- ・染料を変えることにより任意の波長の光を吸収させ、端面から放射させることができる。

4. 厚板形 LSC を用いたタンデム形光電変換デバイス

ここでは新しい波長分割形太陽電池の一つである LSC を用いたタンデム形光電変換デバイスについて述べている。なぜこれから示すような構造をしているのか、従来の方式と比較してどのような利点があるのか、何%程の変換効率が期待できるのか、そしてそれを計算するためにどのようなシミュレーションを行ったのかを述べている。

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づけ

太陽電池の光電変換効率を革命的に向上させる方法として、太陽光の波長別変換に関する研究開発(波長分割形太陽電池)について 1 章で少し触れたが、多くの問題によって現在のところ理論効率より大幅に遅れをとっている。¹⁶⁾ そこでここでは LSC を用いた新しいタイプの波長分割形光電変換システ

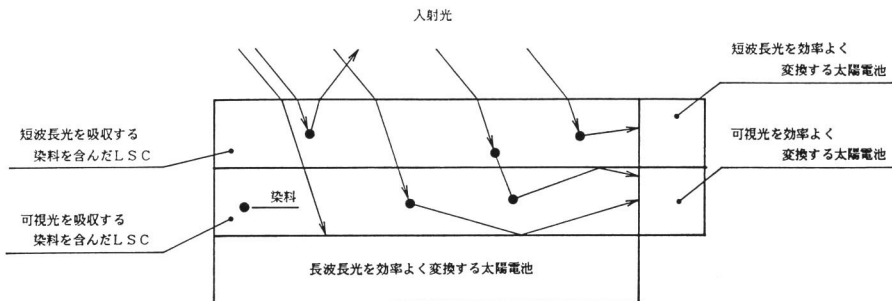


図 4.1 LSC を用いた新しい多端子タンデム形デバイス

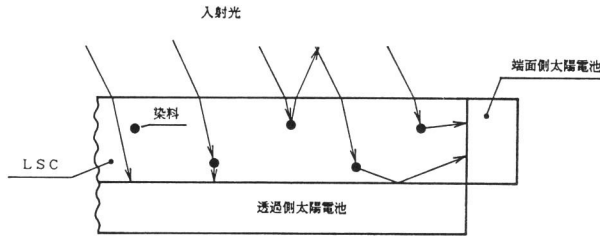


図 4-2 LSC を用いた 4 端子タンデム形光電変換デバイス

ムについて述べる。

図 4-1 に示すのが本タイプの代表的な構造である。まず LSC 上面より入射した光は、一枚目の 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陽電池 (例えば Ge 半導体太陽電池) へと入射する。一方一枚目の 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 2 eV 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。また二枚目の 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。従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。この方式は従来のタンデムセルに比べて、

- ・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 の時に比べて端面側太陽電池の効率上がる。
- ・現用の太陽電池を使用するので大きな技術上のブレークスルーが必要とされない。
- ・個々の太陽電池の分光感度域を狭く効率よく設計すれば、より高効率を得られる。この時に隣の膜との相性を考えなくてよい。

等の利点が考えられる。欠点としては、

- ・複数個のセルや LSC を用いるのでコストがかかる。
- ・端面側が集光されるので温度が上がる。

等が考えられる。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。

欠点として

- ・光エネルギーのロスが大きい。

等が考えられる。しかしこれらの欠点のうち温度上昇と光エネルギーのロスは LSC を溶液形にすることによってある程度改善できるであろう。¹⁷⁾

4-2 厚板形 LSC を用いたタンデム形光電変換デバイス (4 端子形)

ここでは新しいタイプの波長分割形太陽電池の光電変換効率を、図 4-2 に示すもっとも基本的な 4 端子形について求めてみる。組み合わせず太陽電池は端面側に変換効率 10% (AM 1.5) のアモルファスシリコン太陽電池、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と仮定した。各々の相対的な分光感度特性は図 4-7 に示したアモルファス、多結晶の値を用いた。今回の計算に於て染料に左右される η_{stok} , η_{dye} , と LSC の大きさに左右される η_{mat} は無視し、また LSC の染料は、吸

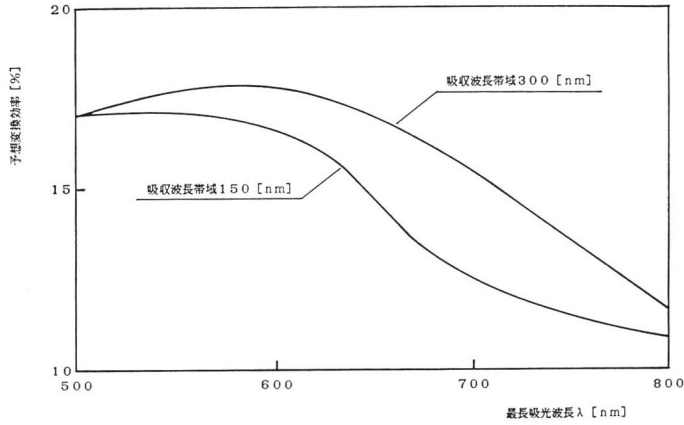


図 4.3 予想変換効率曲線

吸収波長帯域の光は 100% 吸収発光しそれ以外の光はまったく吸収しないと仮定した。

先ず図 2.1 で、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。ここで一部 ($\eta_{\text{abs}}(\lambda)$) 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 (η_{qua}) となって放射し内部反射により端面へと向かう。従って端面の太陽電池から得られる電力を T_e とすれば

$$T_e/P \doteq (1-R) \cdot \eta_{\text{trap}} \cdot \eta_{\text{qua}} \cdot \int \eta_{\text{abs}}(\lambda) \cdot \eta E_a(\lambda) d\lambda \quad (4.1)$$

一方、透過側太陽電池から得られる電力を T_t とすれば

$$T_t/P \doteq (1-R)^2 \cdot \int (1-\eta_{\text{abs}}(\lambda)) \cdot \eta E_p(\lambda) d\lambda \\ + (1-R) \cdot (1-\eta_{\text{trap}}) \cdot \eta_{\text{qua}} \cdot \int \eta_{\text{abs}}(\lambda) \cdot \eta E_p(\lambda) d\lambda \times 1/2 \quad (4.2)$$

従って、両者合わせた変換効率は

$$\eta = (T_e + T_t)/P \quad (4.3)$$

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。(4.2) 式の後半は蛍光が下面より漏れているためである。(4.1), (4.2) 式を使って求めた変換効率を図 4.3 に示した。ただし LSC 染料の光吸収波長帯域を 150 nm と 300 nm の二つに仮定し、染料の最長吸収波長をパラメータとして表した。この結果、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 既製の太陽電池を使用時のシミュレーション

4.2 節の理論に従って、実際に LSC (3 章で計測したものを使用) と太陽電池を使って第 5 章で 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った。そこで、ここでは実験に先だって (4.1) 式と (4.2) 式を使って発電量と変換効率をシミュレートしてみた。デバイスの構造は図 4.2

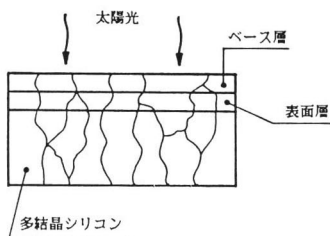


図 4.4 多結晶シリコン太陽電池構造図

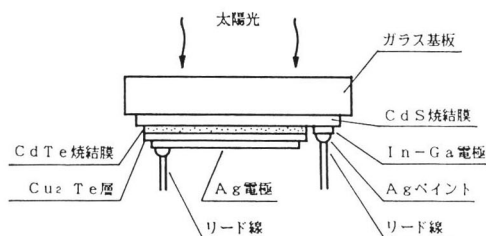


図 4.5 CdS/CdTe 太陽電池構造図

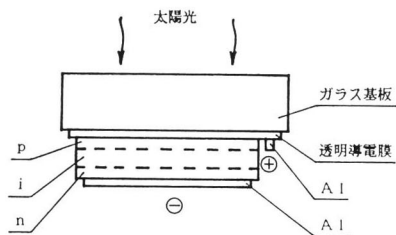


図 4.6 アモルファスシリコン太陽電池構造図

と同じである。LSC は黄色系、赤色系とも 10 mm 厚のもの（外形と特性は 3 章に示した）を使用し、太陽電池は端面、透過側共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計算した。透過側太陽電池の面積は 8×8 cm、端面側太陽電池の面積は 8×1 cm とした。これらの太陽電池セルの構造を図 4.4～図 4.6 に、分光感度特性を図 4.7 に、それぞれ個々シミュレータ光に対する変換効率を表 4.1 に示した。分光特性は各太陽電池に $42.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ のモノクロ光を当て（バイアス光なし）、 $320 \sim 1200$ nm の範囲で短絡電流を計測することにより求め、多結晶太陽電池の 840 nm における値を基準として相対値化した。変換効率は図 5.1 (b) の構成で、計測した。シミュレータの出力は太陽電池表面においてグローバルで $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ （単結晶シリコンにより校正）である。

表 4.2、表 4.3 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 4.4、表 4.5 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。この結果、表 4.1 と比べて効率の改善が見込まれるのは黄色 LSC、赤色 LSC 共に端面に a-Si 太陽電池、透過側に CdS/CdTe 太陽

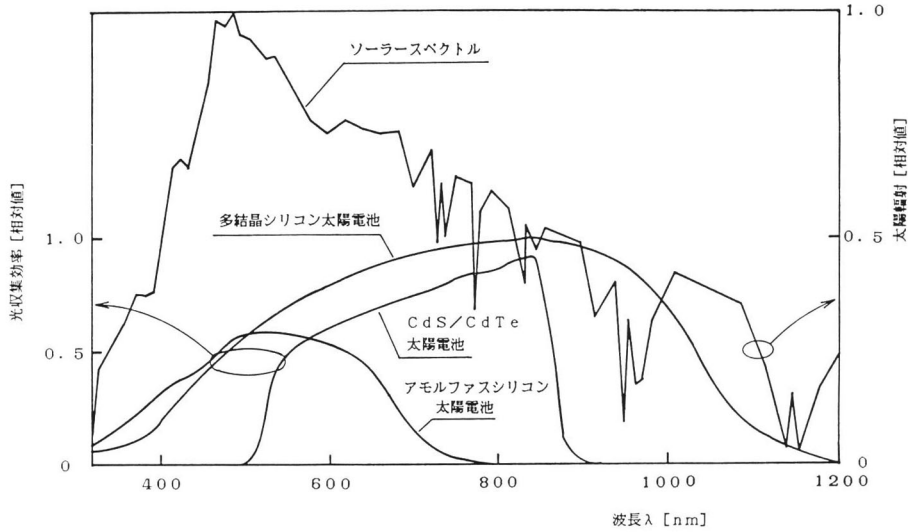


図 4.7 太陽電池の分光特性

表 4.1 太陽電池の変換効率

| 太陽電池 | 効率 [%] |
|---------|--------|
| a-Si | 4.6 |
| poly-Si | 12.5 |
| CdS | 6.3 |

a-Si: アモルファスシリコン太陽電池

CdS: CdS/CdTe 太陽電池

poly: 多結晶シリコン太陽電池

表 4.2 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

| 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 | 17.3 |
| poly | 623.1 | 102.5 |

表 4.3 表 4.2 より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

| 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 4.4 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

| 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 4.5 表 4.4 より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

| 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 |

電池を用いた場合である。残念ながら既製の太陽電池を用いたためにあまり顕著な効率の改善は見込まれない。これは既製の太陽電池が単体で効率を上げるために分光特性が広く、組み合わせて用いた場合、分光特性の重なりが大きいためである。また図 1.9 からわかるが、多結晶太陽電池に対して他の二つの太陽電池の変換効率が低くすぎて、組み合わせてもそれによる効率の向上が期待できないのである。

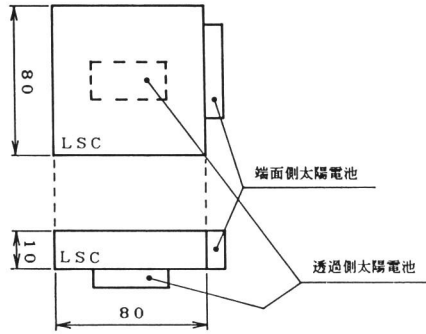
なお表 3.1 をみると黄色 LSC、赤色 LSC 共に光学的効率は 3 mm 厚 LSC のほうが良いが、既製の太陽電池と組み合わせる都合上 10 mm 厚でおこなった。

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

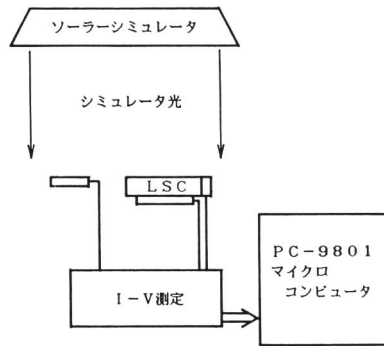
4 章に示したシミュレーションの精度と、実際に既製の LSC と太陽電池を用いて効率が上がるのかを確かめるために、ソーラーシミュレータと屋外太陽光下で発電試験を行った。この結果、本タイプのデバイスが効率の向上に有効であることが示された。そして 4 章での計算値との誤差について述べ、このシミュレーションの有用性と改良点に言及する。

5.1 ソーラーシミュレータによる発電試験

LSC を用いた 4 端子形光電変換デバイス (図 4.2) の実際の効率測定は図 5.1 の構成で行った。(a) に於て LSC の大きさは $80 \times 80 \times 10$ mm で黄色系、赤色系共に 10 mm 厚の LSC (図 3.1) を用いた。端面と透過方向に使用した太陽電池は 4 章で示した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) 太陽電池を各々使用した。各太陽電池は端面の面積 (80×10 mm)、透過方向の面の面積 (80×80 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 5.1 (b) のソーラーシミュレータの出力はグローバルで 100 mW/cm^2 (単結晶シリコンにより校正) で、図 5.1 (a) に於て黄色系と赤色系の LSC について太陽電池を色々に変え、出力と変換効率を求めた。



(a) 実際のデバイス構成



(b) 測定概念図

図 5.1 ソーラーシミュレータによる発電特性測定図

黄色系 LSC を用いて組んだ 4 端子形光電変換デバイスの効率を表 5.1, 表 5.2 に示す. 同様に赤色系 LSC と組んだ 4 端子形光電変換デバイスの効率を表 5.3, 表 5.4 に示す. 出力値は, 透過側は $80 \times 80 \text{ mm}$ に端面側は $10 \times 80 \text{ mm} \times 4$ の広さに換算したものである.

上記表 5.1~表 5.4 と表 4.1 を単純に比較して次のことがわかった.

- ・ 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 太陽電池を使用して, 端面側にアモルファスシリコンか或は 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のみであった.
- ・ 4.6% と 6.3% の太陽電池を組み合わせると 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と 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.

更に 4.3 節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わかった.

- ・ 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

表 5.1 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

| 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 5.2 表 5.1 より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

| 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 5.3 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

| 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 5.4 表 5.3 より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

| 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 |

る。

- ・ LSC 下面の太陽電池の発電量の計算値との違いは、大体数%以内である。
- ・ 端面側太陽電池の発電量は計算値とは大きく異なっている。

表 5.5 太陽電池の変換効率

| 太陽電池 | 効率 [%] |
|---------|--------|
| a-Si | 5.1 |
| poly-Si | 11.5 |
| CdS | 6.8 |

表 5.6 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

| 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 5.7 表 5.6 より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

| 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 |

- ・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。
- ・従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。

5.2 屋外太陽光による発電試験

ここでは実際に屋外太陽光下で、発電試験をおこなった。実験は図 5.1 (a) の構成で、5.1 節と同様に行った。この時の天気は快晴で全天日射の内、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 mW/cm^2 であったが、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時の実験値と比較する為に、入射エネルギー密度を 100 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。

まず各種太陽電池単体の太陽光に対する変換効率を表 5.5 に示した。次に 5.1 節と同様に測定結果を表 5.6~表 5.9 に示した。これらから次の事が言える。

- ・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、赤色系 LSC を使用した場合共にシミュレータでの組合せと同じである。
- ・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。

表 5.8 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

| 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 5.9 表 5.8 より求めた 4 端子タンデム形光電変換デバイスの効率

| 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 |

・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共に計算値より高く, 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。
- ・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。表 4.1 と表 5.5 を比較すると

- ・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 の下面共に 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

先ず重要なことはこれらの LSC を用いたタンデム形タイプのデバイスを使用することにより、変換効率が向上したことである。例として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%

屋外太陽光で

- ・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。このことからこの様に 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画期的な変換効率を持つデバイスが作られうる事が示された。そして現在考えられうる 14% の変換効率をも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と予想される。また本研究で示したシミュレーションが有用であることがわかった。

今回シミュレーションと実験値が異なった最大の原因はストークスシフトによる影響をシミュレーションでは考慮しなかったことにある。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、赤色系共に LSC の透過側に CdS/CdTe 太陽電池、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。しかし、実験結果はソーラーシミュレータによる実験値、屋外太陽光による実験値共に黄色系 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或は CdS/CdTe 太陽電池を使用した場合であった。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。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ない。したがって上記の組合せで 18% 以上になる可能性もある。なぜなら、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 ぐらいの光になる。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 の時の 8 割程度しか電気に変えることができない。従って、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はずれてしまった。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、CdS/CdTe 太陽電池は高めの実験値となった。4 章の式で言えば透過側は蛍光の漏れ成分のみ $((1-R) \cdot (1-\eta_{\text{trap}}) \cdot \eta_{\text{qua}} \cdot \int \eta_{\text{abs}}(\lambda) \cdot \eta E_p(\lambda) d\lambda \cdot 1/2)$ に掛かるのであるが、端面光側は T_e/P の値全体に掛かる為、端面側の発電量が大きくずれたのである。

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太陽電池セル単体の各々の発電量の違い(表 4.1 と表 5.5) 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。ただ端面側の発電量のみ 20~30% も高い理由は判明しない。

今回は既製の LSC と太陽電池を使用したため、太陽電池の組合せも LSC の吸光、発光波長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。これは図 4.7 より明かであるが、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が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、発光波長と合わなかったためであ

る。従ってもっといろいろな吸光、発光波長を持つ染料でドーブされた 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したと考えられる。

6. 結 論

LSC は本論文中に幾度か示したように、光の分配、分光、光の波長変換、集光等の特徴を持つ光学材料である。これの詳細を第 2 章に於て明らかにし、第 3 章に於て種々の実験を行ったことにより 8×8 cm 角程度の LSC で、

- ・入射した太陽光の内、約 70~80% を下に透過させる。
- ・約 20~40% を吸収する。
- ・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。
- ・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。
- ・ 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、厚さを薄くすることで行った方が効率がよい。
- ・LSC の η_{opt} を低くしている原因の主なもの η_{abs} (0.2~0.4)、 η_{stok} (0.75)、 η_{dye} (0.75) であり、従って通常 η_{opt} は 0.2~0.4 程度である。

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ことが推測できる。その一例が本研究で示した多端子形タンデム光電変換デバイスである。

本研究に示した多端子タンデム形光電変換デバイスは図 4.2 の様な基本構造をしており、これ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 の時に比べて端面側太陽電池の効率が上がる。
- ・現用の太陽電池を使用するので大きな技術上のブレイクスルーが必要とされない。
- ・個々の太陽電池の分光感度域を狭く効率よく設計すれば、より高効率を得られる。この時に隣の膜との相性を考えなくてもよい。

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もっと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わかった。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ことが示された。今回は入手が容易な既製の LSC と太陽電池を使用したので、光のマッチングが完全には取れていなかった。これを改善すれば同じ太陽電池を使用してもより高効率を得られるであろう。

また、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て、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% かそれ以上の変換効率を期待できる。

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た結果、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 4 章に示したモデルと計算式はより実用的となる。

謝 辞

本研究に御協力いただいた機械電子検査検定協会の各位、並びに資料を提供して頂いた富士電機総合研究所 (株)、松下電池工業 (株)、シャープ (株) の各社に、そして研究室諸氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 伊藤公正編 1980. 『プラスチックデータハンドブック』東京 工業調査会, 33.
- 2) WITTWER, V. *et al.*, 1980. Efficiency and stability of experimental fluorescent planar concentrators (FPCs). Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 760-764.
- 3) 例えば, STAHL, W. *et al.*, 1976. Thermal conversion with fluorescent concentrators. *Solar Energy*, **36**(1): 27-35.
- 4) 例えば, ZASTROW, A. *et al.*, 1981. On the conversion of solar radiation with fluorescent planar concentrators (FPCs). Proc. 3rd EC Photovoltaic Solar Energy Conf., 413-417.
- 5) 村橋俊介ほか編 1979. 『プラスチックハンドブック』東京 朝倉書店, 389-411.
- 6) HERMANN, A. M., 1982. Luminescent solar concentrators-a review. *Solar Energy*, **29**(4): 323-329.
- 7) GOETZBERGER, A. and WITTWER, V., 1981. Fluorescent planar collector-concentrators-a review. *Solar Cells*, **4**: 3-23.
- 8) 作田宏一 1986. 「けい光体による太陽光集光系」, 電子技術総合研究所彙報, **50**(8): 787-796.
- 9) 電気学会通信教育会編 1964. 『照明工学』東京 電気学会発行所, 140-151.
- 10) 桑野幸徳 1985. 『太陽電池とその応用』東京 パワー社, 9-14.
- 11) 電気学会太陽電池調査専門委員会編 1985. 『太陽電池ハンドブック』東京 コロナ社.
- 12) 有機合成化学協会編 1970. 『染料便覧』東京 丸善株式会社, 25-29.
- 13) 久保田広ほか編 1984. 『光学技術ハンドブック』東京 朝倉書店, 369-372.
- 14) 田幸敏治ほか編 1981. 『光学的測定ハンドブック』東京 朝倉書店, 340-367.
- 15) 作田宏一 1986. 「けい光体による太陽光集光系」, 電子技術総合研究所彙報, **50**(8): 787-796.
- 16) 浜川圭弘 1986. 「太陽電池の高効率化に関する研究とその技術開発の現状」, 日本太陽エネルギー学会誌, **12**(6): 5-10.
- 17) 前島正裕ほか 1988. 「LSC を用いたタンデム形光野変換デバイス」, 電気学会論文誌, **D 108**(2): 131-135.