LSC を用いたタンデム形光電変換デバイス

准員	前島正裕	(東京農工大)
正員	清水卓夫	(東京農工大)
正員	堀米孝	(東京農工大)
正員	羽根義	(清水建設)
非会員	巻口浩	(三井東圧化学)

1. はじめに

太陽電池は、ここ数年の研究開発努力によって大幅に普及してきた。特に、小形小面積のアモルファス形太陽電池は、近年電卓の分野などで多数使用されるようになってきた。しかし、太陽電池が電力用に使用されるようになるまでには、セルや周辺機器のコスト、効率などの面で改善されなければならない点が多い。

効率の改善については、現在セル自体の効率改善とタンデム化⁽¹⁾による高効率化が研究されてきている。タンデム化とは、簡単に述べると、各々バンドギャップの異なった太陽電池を積み重ね、上面より光が入射すると、順次各々の分光感度に合った光を電気に変換するものである。このような構造にすることによって、単一の太陽電池セルより太陽光の広い波長帯にわたって光エネルギーを電気に変換させ、効率を上げようというものであるが、膜質などに問題が残されている。

そこで、最近、固定集光器として注目を集めている LSC (Luminescent Solar Concentrator)^{(2)~(4)}に着目し、これを用いて太陽エネルギーを高効率で電力に変換する、新しい多端子形タンデム光電変換デバイスを考案した⁽⁵⁾。LSC とは、図 1 のような透明媒質中にけい光染料を分散させたもので、通常、平板状である。この上面より入射した光の一部はけい光染料にトラ

図 1 LSC

Fig. 1. Luminescent solar concentrators, LSC.

ップされ、再放射され空気と母材の屈折率によって端面から放射する。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いる^{(6)~(7)}。

本デバイスは既製のいかなる太陽電池でも組合せられるうえ、従来のタンデム形である単純な積み重ね形と違い、LSC の構造上、端面に用いる太陽電池は下面に用いる太陽電池に比べ非常に小面積で済む。

本論文では、LSC の基本的な光特性を測定分析し、これを用いた多端子形タンデム光電変換デバイスを提案し、その基本的なタイプである四端子形光電変換デバイスの発電試験を行った。その結果、このデバイスが効率の向上に役立つことが確認された。

2. LSC を用いた多端子光電変換デバイスの構造

〈2・1〉 LSC けい光コレクタ (LSC) に入射した光の様子を図 2 に示した。同図で LSC 上面より入射

Tandem Type Photovoltaic Device with LSC. By Masahiro Maejima, Associate, Takuo Simizu, Member, Takasi Horigome, Member (Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology), Tadasi Hane, Member (Institute of Technology, Simizu Construction Co., Ltd.) & Hiroshi Makiguchi. Non-member (Mitsutoatsu Chemicals, Inc.).

前島正裕：准員，東京農工大学工学部電気工学科

清水卓夫：正員，東京農工大学工学部電気工学科

堀米 孝：正員，東京農工大学工学部電気工学科

羽根 義：正員，清水建設(株)技術研究所研究部・企画部

巻口 浩：非会員，三井東圧化学(株)機能性ポリマー事業部

図 2 LSC 中の光

Fig. 2. Solar ray in a LSC.

図 3 実験に使用した LSC の光特性

Fig. 3. Characteristic of lights through LSC used this experiment.

した太陽光のうち、一部特定波長の光はけい光染料によりトラップされ、残りの光は LSC 下面へと透過する。一方、トラップされ、ストークスシフトされ、再放射された光は空気と LSC 母材の屈折率により大部分端面へと導かれ、残りの一部は LSC 上面および下面から放射する。LSC の母材としてはガラスまたは PMMA (ポリメチルメタクリレート) が用いられる。PMMA とはメタクリル樹脂 (あるいは広くアクリル樹脂) と呼ばれ、一般的にはメタクリル酸メチルを主体とするポリマーのことである。図 3 は本実験に用いた LSC の光特性である。LSC 端面光とは、LSC 上面より太陽光が入射したときに LSC 端面より放射する光で、 $0.58 \mu\text{m}$ におけるピーク値を 1.0 として図に示した。同様に、太陽光透過率とあるのは、LSC 上面に入射した太陽光が下面から透過してくる割合である。波長が $0.58 \sim 0.66 \mu\text{m}$ の範囲で 1.0 を超えているが、これはけい光が下面から漏れて染料に吸収されなかった透過光に重畳しているためである。この端面から放射する光の集光比は、理想的には端面の面積の合計に対する太陽光の入射する面積との比になるので、簡単に集光比を上げることができる。しかも、LSC 上面より入射する光は全反射角以内の光ならば直達光であろうと散乱光であろうと、LSC 内部へと増過し端面へと集光されるので追尾の必要はなく、ま

表 1 実験に使用した LSC の特性

Table 1. Characteristics of LSC used this experiment.

幾何学的集光比 C	エネルギー効率 $\eta_{\text{energy}}(\%)$	エネルギー透過率 $T_{\text{energy}}(\%)$	外形寸法 (mm)
2	14	76.1	$80 \times 80 \times 10$

た散乱光も集光することができるという特徴をもっている。

ここで、LSC の光学的特性を以下のように定義すれば、本実験で使用した LSC について値を求めると表 1 になる。

幾何学的集光比 C

$$C = \frac{\text{受光面積}}{\text{出射面積}} \dots\dots\dots (1)$$

エネルギー効率 η_{energy}

$$\eta_{\text{energy}} = \frac{\text{端面から出射するエネルギー}}{\text{コレクタに入射するエネルギー}} \dots\dots\dots (2)$$

エネルギー透過率 T_{energy}

$$T_{\text{energy}} = \frac{\text{LSC 下面に透過してくるエネルギー}}{\text{コレクタに入射するエネルギー}} \dots\dots\dots (3)$$

〈2・2〉 LSC を用いた光電変換デバイス

現在、LSC に関する研究の多くは端面の放射光に注目し、端面に太陽電池あるいは集熱パイプを設ける研究が行われている。著者らはこの端面光のほかに、現在あまり活用されていない透過光 (図 3) をも活用すべく、図 4 に示した変換デバイスを考案した。図 4 (b) の六端子形は同図 (a) の四端子形の LSC 表面に透明形アモルファス Si 太陽電池を設置したものである。上面より入射した太陽光は、まずこの太陽電池により電気に変換され、LSC に入射する。LSC に入射した光は〈2・1〉節に示したように、端面と透過方向にそれぞれ特有の光を放射する。このとき、LSC の端面と下面に各々の光にマッチした分光感度特性をもつ太陽電池を設置すれば、つまり染料に吸収される波長帯が LSC 下面の透過側太陽電池の分光感度域になれば、下側の太陽電池は直接太陽光に照射された場合と同程度の発電量が得られるはずである。一方、端面光側の太陽電池の分光感度域が端面光の波長帯と重なっていれば、この太陽電池からも相当量の発電量が得られることになる。

3. 発電試験

発電試験は本デバイスの基本的な動作を確認するために、図 4 (a) の四端子形光電変換デバイスについて

図 4 新形多端子光電変換デバイス

Fig. 4. A new multi-terminal tandem photovoltaic device.

図 5 太陽電池の分光感度特性

Fig. 5. Spectrum of solar cells.

行った。LSC の大きさは $80 \times 80 \times 10$ mm で、端面と下側に使用する太陽電池はそれぞれ既製のアモルファス Si 太陽電池、化合物半導体 (CdS/CdTe) 太陽電池、多結晶 Si 太陽電池の三種類である。各太陽電池の分光感度特性を、多結晶 Si 太陽電池の $0.82 \mu\text{m}$ のモノクロ光に対する感度を 1 とし図 5 に示した。なお、

表 2 各種組合せによる四端子形デバイスの発電試験結果

Table 2. Conversion efficiencies of each four-terminal tandem photovoltaic device.

太陽電池セルの組合せ		出力 (mW)			効率 (%)
透過側	端面側	透過側	端面側	総出力	
太陽電池	太陽電池				
a-Si	a-Si	152.4	56.1	208.5	3.26
a-Si	poly	152.4	82.4	234.8	3.67
a-Si	CdS	152.4	70.7	223.1	3.49
poly	a-Si	644	56.1	700.1	10.94
poly	poly	644	82.4	726.4	11.35
poly	CdS	644	70.7	714.7	11.17
CdS	a-Si	378.4	56.1	434.5	6.79
CdS	poly	378.4	82.4	460.8	7.20
CdS	CdS	378.4	70.7	449.1	7.02

a-Si: アモルファス Si 太陽電池

poly: 多結晶 Si 太陽電池

CdS: 化合物半導体 (CdS/CdTe) 太陽電池

表 3 各種太陽電池セル単体の発電効率

Table 3. Conversion efficiencies of each photovoltaic cell.

太陽電池セル	入力 (mW)	出力 (mW)	効率 (%)
a-Si	6,400	293.6	4.59
poly-Si		800	12.49
CdS		405.6	6.34

太陽電池はそれぞれ LSC の端面 (80×10 mm)、下面 (80×80 mm) より小さいものを使用し、各々の面積分に換算した。効率測定にはソーラーシミュレータ (AM 1.5 に近似、照射強度 100 mW/cm^2 、単結晶 Si 太陽電池で校正) を用いて行い、測定結果を表 2 に示した。本デバイスは四端子形なので、各デバイスの効率は端面の太陽電池・下面の太陽電池各々の $I-V$ 曲線を求めて発電量を合計し、各四端子形光電変換デバイスの発電量とし、デバイスへの入射エネルギー $6,400 \text{ mW}$ (80×80 mm) で割って求めた。また比較として、同条件下で上記三種の太陽電池セル単体の発電量と効率を測定し表 3 に示した。

4. 評価

表 1 と図 4 から、透過側 (下面) の太陽電池に入射する光エネルギーが太陽エネルギーの 76% であるのに対して、端面側の太陽電池に入射する光エネルギーは 14% である。このため、四端子形デバイス全体としての発電効率は透過側太陽電池の発電量に大きく左右される。従って図 3 と図 5 より、今回の場合、染料の吸収帯 ($0.45 \sim 0.55 \mu\text{m}$) がアモルファス Si 太陽電池や多結晶 Si 太陽電池の分光感度域内にあるため、これらの太陽電池を透過側に用いた場合、表 2 と表 3

図6 太陽電池とLSCの光特性
Fig. 6. Characteristics of light with LSC and photovoltaic cells.

を比べると、デバイスの効率は良くない。一方、透過側に化合物半導体太陽電池を用いた場合、太陽光のうち、この太陽電池の分光感度帯域内 ($0.55 \sim 0.87 \mu\text{m}$) の光はほとんどロスなしにLSCを透過してくるために、透過側の発電量は表2に比べてあまり低下していない。従って、透過側に化合物半導体太陽電池を用いた場合について述べる。

(1) 端面にアモルファスSi太陽電池を用いた場合 変換効率4.6%のアモルファスSi太陽電池と6.4%の化合物半導体太陽電池を用いた本デバイスの変換効率は6.8%であった。

図7を見ると、LSCの透過光と化合物半導体太陽電池、LSCの端面光とアモルファスSi太陽電池の分光感度特性の関係が良くわかり、本デバイスが本論文の目的どおり機能しているのがわかる。また、染料の吸収・発光波長がより短波長側にあれば(ともに $0.04 \mu\text{m}$ 短波長側にシフトすれば)本デバイスの効率は7.3%になると予想される。更に、今回は既製の太陽電池を用いたため、各太陽電池の分光感度域が重なり過ぎていた。従って、もっとセパレーションの良い組合せと高い変換効率の電池を使えば更に効率が向上すると考えられる。

(2) 端面に化合物半導体太陽電池を用いた場合

このタイプの場合、端面も透過側も同一の太陽電池である。従って、太陽電池に入射するエネルギーは太陽光の14%と76%であるので、このデバイスの変換効率はこの化合物半導体太陽電池セル単体の発電効率(6.4%)よりLSCによるロスの分だけ低下すると考

図7 光熱ハイブリッドデバイス

Fig. 7. The hybrid device which converts light and heat.

えられそうである。しかし、実際はストークスシフトによって端面光が長波長側にシフトすることにより、今まで化合物半導体太陽電池にとって電気に変換できなかった光が変換できるようになり、7.2%の変換効率が得られている(図6参照)。

(3) 端面に多結晶Si太陽電池を用いた場合

今回使用した太陽電池の分光感度特性(図5)を見ると、 $0.32 \sim 1.2 \mu\text{m}$ の全域にわたって化合物半導体太陽電池より多結晶Si太陽電池のほうが太陽エネルギーから電気への変換率が良い。このために、多結晶Si太陽電池セル単体に太陽光を照射したほうが効率が良い。

以上から、本デバイスとして良好に機能する組合せは(1)項と(2)項であり、このようにLSCと組合せることにより、本デバイスが効率の向上に有効であることがわかった。

5. 溶液形LSC

今回使用したLSCは、入射エネルギーの約10%が熱になっていると考えられる。そこで、薄膜形LSC⁽⁶⁾の原理を応用して、図7のようにLSCを溶液形にすることによって、この熱を熱交換器を通して取出す方式を考案した。これによって、多種類の染料による実験が染料溶液の状態で行えるうえ、太陽電池の冷却にもなり、この光熱ハイブリッド化によってより高効率なエネルギー変換が可能となろう。

6. まとめ

本論文ではLSCを光の選別・集光装置として用いた多端子形光電変換デバイスを考案し、実際に既製の太陽電池を使用して、その基本的タイプである四端子形光電変換デバイスについて実験を行った。

その結果、以下のことがわかった。

- (1) このデバイスは効率の改善に有用である。
- (2) 本デバイスの効率は透過側太陽電池の変換効率に大きく左右される。

(3) 従って、透過側に効率の良い太陽電池を用いて、端面側に染料の発光波長にあった太陽電池を使用すれば、いずれの太陽電池セルよりも効率良く太陽光を電力に変換できると予想される。

(4) 端面側太陽電池は透過側に比べて非常に小面積にすることができ (LSC を薄くすればよい)、低コストである。

そこで、今後はより多くの種類の太陽電池を使用し、かついろいろな染料との組合せを実験し高効率化を図っていきたい。

最後に、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、ならびにアモルファス Si 太陽電池を提供していただいた(株)富士電機総合研究所、化合物半導体太陽電池 (CdS/CdTe) を提供していただいた松下電池工業(株)、多結晶 Si 太陽電池を提供していた

だいたシャープ(株)の各社に感謝します。

(昭和 62 年 6 月 25 日受付)

文 献

- (1) 浜川：「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」, 太陽エネルギー, 12, 5 (昭 61)
- (2) 作田：「けい光体による太陽光集光系」, 電機研彙報, 50, 787 (昭 61-8)
- (3) J. S. Batchelder, A. H. Zewail & T. Cole: "Luminescent Solar Concentrators. 1: Theory of operation and techniques for performance evaluation", *Appl. Optics*, 18, 3090 (1979)
- (4) J. S. Batchelder, A. H. Zewail & T. Cole: "Luminescent Solar Concentrators. 2: Experimental and Theoretical analysis of their possible efficiencies", *ibid.*, 20, 3733 (1981)
- (5) 堀米, 他: 「蛍光型集光板を用いた高効率太陽光発電方法及びデバイス」, 出願番号 No. 61-150109 (昭 61)
- (6) W. Stahl, V. Wittwer & A. Goetzberger: "Thermal Conversion with Fluorescent Concentrators", *Solar Energy*, 36, 27 (1986)
- (7) A. Zastrow, K. Heidler, R. E. Sah, V. Wittwer & A. Goetzberger: "On the Conversion of Solar Radiation with Fluorescent Planar Concentrators (FPCs)", *Proc. 3rd E.C. Photovoltaic Solar Energy Conf. Connes*, p. 413 (1981)
- (8) A. M. Hermann: "Luminescent Solar Concentrators-A Review", *Solar Energy*, 29, 323 (1982)