

太陽エネルギーの波長変換による光合成促進 に関する基礎研究

Basic Study on Effective Utilization of Solar Energy for Photosynthesis

谷 辰 夫* 奥 本 哲 也**
Tatsuo TANI Tetsuya OKUMOTO
小 須 田 始**
Hajime KOSUDA

Abstract

Photosynthesis is a complicated phenomenon, but it is considered to be one of the influential utilization of solar energy. Recently, in plant product systems, it is tried to shift solar spectrum into useful spectrum for photosynthesis. The purpose of this study is to identify the spectrum which serves for solar energy to perform carbon fixation in various plants and to study conversion of solar spectrum by using luminescent solar concentrator (LSC).

At first, the absorption of spectrum in plants and the spectral characteristics of fluorescent dyes are measured by the spectrophotometer and the fluorophotometer. As a result, it is found that plants have the selective wavelength in carbon fixation, and fluorescent dyes show single peak wavelength in luminescence and absorb the spectrum less than its peak luminescent wavelength. Thus, it is expected that photosynthesis is promoted by the fluorescent dye which shows luminescent characteristics adapted to carbon fixation of plants. But the greater promotion cannot be expected by using only single converted light, because plant has double peak wavelengths against fluorescent dye which has single peak, and also other part of the spectrum is more or less effective for photosynthesis. Therefore if the light which is shifted in wavelength and the natural light or two kinds of fluorescent dyes are used simultaneously, the most efficient choice of light can be made for photosynthesis.

It comes to the conclusion that effective utilization of solar energy for photosynthesis can be made by converting solar spectrum effectively.

Key Words : Utilization of solar energy, photosynthesis,
luminescent solar concentrator, fluorescent dye.

1. まえがき

光合成は複雑な現象であるが、太陽エネルギー利用の究極の姿である。筆者らは、太陽光スペクトルを植物などの利用系に最も望ましいスペクトル分布に改質（波長変換）し、光合成を通して太陽エネルギーを固定変換するための基礎研究に着手した⁽¹⁾。本研究の目的は、植物体の波長別光吸収特性と波長変換材料として知られる各種蛍光染料の光学特性を取得し、光合成促進に寄与する波長特性について検討して、最適波長の光を照射するための基本技術を確立することにある。

すなわち、植物体が光合成であまり必要としない波

長の光を選択的に波長変換し、光合成の能率を上げることにある。この種の研究では、温室、ビニールハウスなどに波長変換フィルムを使用することが検討されたり一部波長変換機能をもつ塩ビフィルムがイチゴの花芽の促進用に使用されている。しかし、これらは提案の域を出ないものであったり、十分光学特性が把握されていないのが実状である^{(2)・(5)}。

本論文では、まず数種類の植物体に吸収される太陽光のスペクトル特性を測定し、植物体の光吸収率を把

* 東京理科大学 工学部, 教授
Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, Professor

** 東京理科大学 工学部, 元学生
Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, ex-Undergraduate

握した。次いで、光の波長変換材料として知られている各種蛍光染料の光学的特性を測定し、波長変換された太陽光が植物体の光合成促進に寄与し得る度合を考察した。

一般に植物体は太陽光線を吸収して光合成を営んでいるが、すべてのスペクトルを一様に利用している訳でなく、吸収波長に選択性がある。たとえば、クロロフィル a は 400~450nm と 640~660nm の波長領域の光を強く吸収することが知られている。A.L. Lehn-inger は植物体の光吸収スペクトルから光合成における光の利用効率を求めている⁽³⁾。この利用効率の形状は 400~450nm と 640~660nm の波長領域にピークをもつ凹形である。太陽光をこの利用効率の形状に波長変換して、植物体に照射すれば光合成が促進されると考えられる。また、植物体への適用を前提とした蛍光体コレクタについてもふれた。

一般に蛍光体コレクタは、平板状の透明媒質中に蛍光染料を分散させた単純な集光材として知られている^{(4), (5)}。

コレクタの表面に光が入射すると、蛍光染料の吸収波長と一致する波長の入射光は蛍光染料に吸収され、他の波長の入射光はコレクタを透過する。蛍光染料に吸収された光は、蛍光染料によって長波長側へ波長変換され放出される。蛍光染料からの蛍光波長は吸収波長より長くなることはストークスの法則として知られている。平板状のコレクタでは大部分の蛍光（屈折率が 1.5 の透明体では約 75%）は表面、裏面で全反射をおこし、これをくり返しながらコレクタ内部を進行する。このとき、蛍光は波長変換されているため、ほとんど蛍光染料に吸収されることなくコレクタ内部を進行し、最終的にはコレクタの端面から出て行くことになる。したがって、コレクタの受光面積を広くし、コレクタ端面の面積を小さくすれば、コレクタ端面で高強度の光が得られることになる。

このような蛍光体コレクタと太陽電池セルを組み合わせて太陽電池セルの高効率化を図るための研究が進められている⁽⁶⁾。従来の蛍光体コレクタは波長変換と固定集光を実現したものであった。

本論文は、植物体の光合成促進のために蛍光体コレクタを適用することの可能性を検討したものである。太陽光が波長変換された後、等方的に再放射する光を面全体から放出することを指向しており、その基礎特性を第一報として報告するものである。

2. 植物体の光吸収特性

植物体の波長別光吸収特性を求めた。サンプルとし

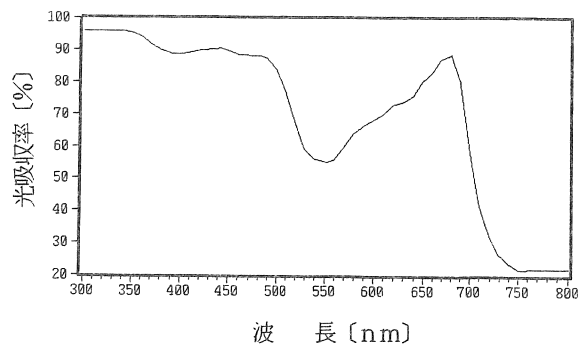


図1 サニーレタスの波長別光吸収率

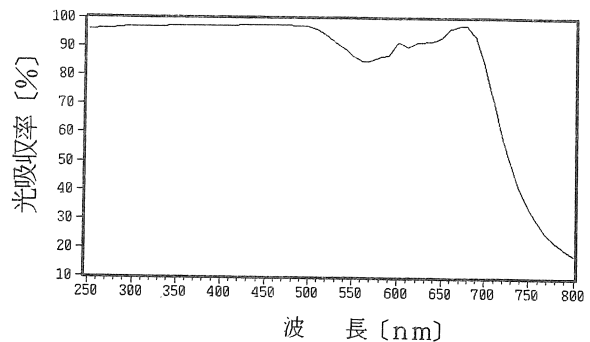


図2 杉の波長別光吸収率

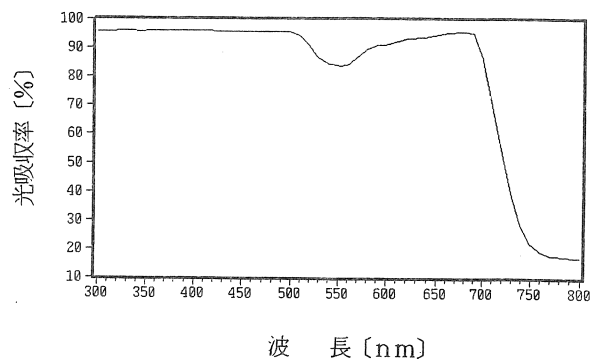


図3 わかめの波長別光吸収率

て、Mサニーレタス、N杉の葉、O海藻（わかめ）の3種類を選んだ。サニーレタスはビニールハウス内、杉は街路、わかめは海中にて生育したものであり、種類の異なる植物体である。

これらのサンプルは、採取後水分を含んだ状態で測定に供された。光吸収特性は日立製U-3210型自記分光光度計（60φ積分球装着）によって測定された。

図1、図2、図3は、サニーレタス、杉、わかめの波長別光吸収率である。いずれのサンプルとも光吸収率に波長選択性がみられた。サニーレタスは660~670nmに光吸収率の極大値を持ち、波長選択性が強いことがわかる。一方、わかめは海中に生育し海水を透過してくる光を最大限に吸収するためか、波長選択性が比較的弱いことがわかる。

一般に、植物体は太陽エネルギーを吸収し、炭素同

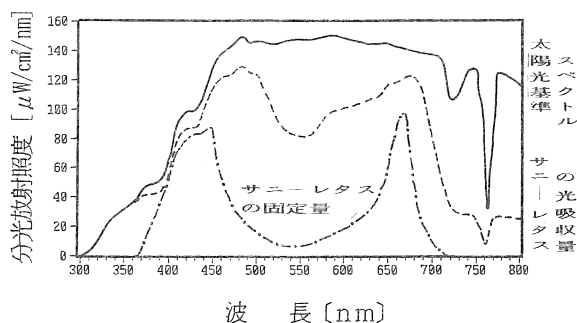


図4 サニーレタスの波長別光吸収量と固定量

化作用によって太陽エネルギーを化学エネルギーに固定する。A.L.Lehninger は、光合成に関する光の利用効率を求めている⁽³⁾

図4はサニーレタスに太陽光基準スペクトルを照射した際のサニーレタスの光吸収量と光合成に関する光吸収量の関係である。本論文では、この光合成に関する光吸収量は化学エネルギーに変換される量に深く関係しているため固定量と称することにする。また、太陽光基準スペクトルとは、太陽電池セルやモジュールの電気出力や変換効率を測定する際、IEC、JIS 原案で規定されているスペクトルのことである。このスペクトルはエア・マスが1.5で300nmから2800 nmまでの波長範囲の全天日射量の積分値が1000W/m²である⁽⁷⁾。

図の横軸は波長であり、縦軸は分光放射照度[μW/cm²/nm]である。図中の実線は太陽光基準スペクトルである。また、点線は、太陽光基準スペクトルに対するサニーレタスの光吸収量である。一点鎖線は、サニーレタスが吸収した太陽光が光合成により化学結合エネルギーに変換される固定量である。この固定量は、サニーレタスの光吸収量とA.L.Lehningerの波長に対する光合成における光の利用効率曲線を掛け合わせて求めている。この固定量を波長360nmから720 nmまで積分した値と太陽光基準スペクトルの300nmから2800nm までを積分した値(1 kW/m²)の比は12.2%となった。

これらのことより、光合成に深く関係する波長は、太陽光の全ての波長が同程度に寄与しているわけではなく、波長選択性が顕著であることがわかる。

3. 蛍光染料の光学特性

波長変換材料として、西独BASF色材研究所において開発された特殊蛍光染料(A:Violet 570, B:Yellow 083, C:Orange 240, D:Red 300)を使用した。光学特性は各染料を酢酸エチル(一級)に溶解(濃度約0.02

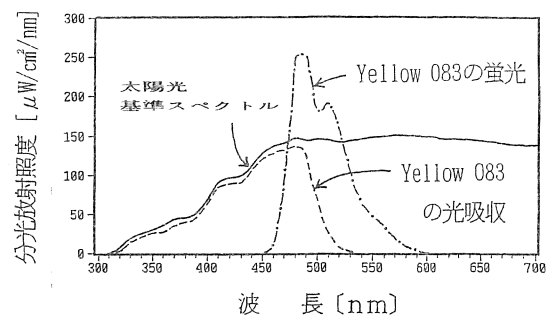


図5 Yellow083 (サンプルB)の波長別光吸収量と蛍光量

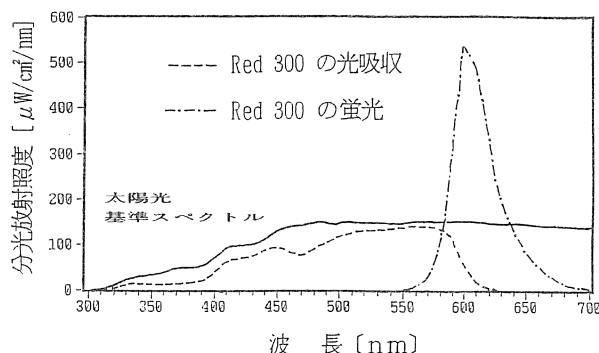


図6 Red300 (サンプルD)の波長別光吸収量と蛍光量

%)させ、石英ガラス製サンプルホルダー(12×12×50 mm)に入れ測定した。測定装置は日立製U-3210型自記分光光度計、F-2000型分光蛍光光度計である。

図5、図6は、サンプルB、Dの波長に対する光吸収及び蛍光量である。有効な蛍光量を求めるには、蛍光染料が光を吸収した後の蛍光量子効率、ストークス損失、トラップ効率、再吸収効率など、いろいろな損失、効率を考慮する必要がある。しかし本論文では、蛍光染料に吸収された量と、蛍光する光の量が等しいと仮定して検討を進めた。その結果、①、サンプルA、B、C、D、の蛍光極大波長は432nmから603nmにわたり、各サンプルの太陽光基準スペクトル照射時の波長別蛍光量の積分値と太陽光基準スペクトルの300 nmから2800nmまでの積分値(1 kW/m²)の比は3.7%から22.7%であった。これらのサンプルを見る限り、蛍光極大波長が長いサンプルほど太陽光基準スペクトルに対する蛍光量が大きいことがわかった。②、各蛍光染料は、太陽光の最短波長である300nm付近から蛍光の極大波長まで幅広い領域の光を吸収することがわかった。③、各蛍光染料は、単一の蛍光極大波長を持った。例えばサンプルD (Red 300)は603nmで蛍光極大波長を示し、太陽光基準スペクトル照射時の波長別蛍光量の積分値と太陽光基準スペクトル

表1 蛍光染料の特性

項目 サンプル	商品名*	極大波長	基準スペクトルに対する 蛍光率**
A	Violet 570	432nm	3.72 %
B	Yellow 083	485	14.36
C	Orange 240	567	18.05
D	Red 300	603	22.73
E	仮想サンプル	660	22.73

* ドイツ BASF 色材研究所において開発

**基準スペクトルとは、標準直達日射スペクトルを積分した値 (100mW/cm²) である。

表2 植物体サンプルの固定量率

項目 サンプル	サンプル名	基準スペクトル に対する 固定量率	各サンプルの蛍光に対する固定量率				
			サンプルA	サンプルB	サンプルC	サンプルD	サンプルE
M	サニールタス	12.2 %	2.5%	1.8%	1.3%	4.1%	9.7%
N	椿の葉	13.9	2.6	2.1	1.9	5.2	10.9
O	わかめ	14.0	2.7	2.1	1.9	5.1	11.0

の300nmから2800nmまでの積分値 (1 kW/m²) の比は22.7%である。また、603nmの蛍光スペクトルの分光放射照度は太陽光基準スペクトルのそれ (145 [μW/cm²/nm]) の約3.8倍であった。

表1は、蛍光染料の光学特性をまとめたものである。サンプルEはサンプルD (Red300) の蛍光分布特性をそのまま長波長側に平行移動させたサンプルで、仮想上のサンプルである。すなわち、サンプルEは蛍光極大波長が603nmのサンプルDの波形をそのまま、蛍光極大波長が660nmになるように長波長側に平行移動させた蛍光波形で、図4に示した固定量曲線の二つの極大波長のうち長波長側の波長に相当する。

4. 太陽光の波長変換と光合成

表2は測定結果に基づいて、3種類の植物体サンプルに各種蛍光染料で波長変換させた蛍光を照射したときの計算によって求めた固定量の割合を示したものである。各植物体の太陽光基準スペクトルの波長別固定量の積分値と太陽光基準スペクトルの300nmから2800nmまでの積分値 (1 kW/m²) の比は12.2~14.0%である。それに対し各種蛍光染料で太陽光基準スペクトルを波長変換させた蛍光を照射したときの波長別固定量の積分値と太陽光基準スペクトルの300nmから2800nmまでの積分値 (1 kW/m²) の比は1.3~11.0%と低いことがわかる。

しかし植物体においては吸収光の波長に選択性があり、吸収特性に2つのピークがあることが特徴であ

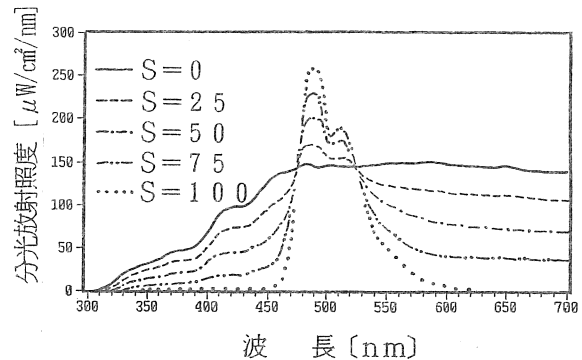


図7 蛍光染料を用いた太陽光の光質変換の1例 (サンプルBの適用)

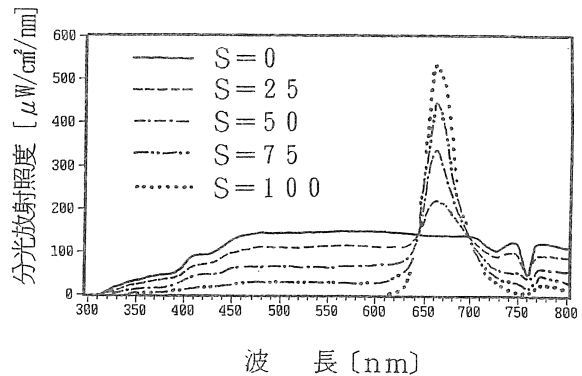


図8 蛍光染料を用いた太陽光の光質変換の1例 (サンプルEの適用)

る。従ってこれらの蛍光染料の特性を見る限りでは、光合成に寄与する長い波長 (660nm付近) 側のピークに対しては波長変換させた光を照射し、短い波長 (460nm付近) のそれに対しては自然光をそのまま放射した方が効果的であると考えられる。

表1のサンプルEはすでに述べたように、仮想サンプルであり、サンプルDの蛍光特性をそのまま極大波長660nmに移動させたものである。サンプルEに関するサニールタスの固定量率は9.7%で、サンプルD (Red 300) のそれに比べ2.37倍に上昇することがわかる。また、660nmの波長付近にのみ注目すれば、太陽光スペクトルのそれに比べ大幅に増加し、波長変換が効果的であることを示している。

これらのことから、サンプルEによる蛍光体コレクタと自然光を併用することによる光合成促進について検討した。

図7、図8は蛍光染料を用いた蛍光体コレクタによる太陽光の光質変換の1例である。図7、図8の蛍光染料はそれぞれサンプルB、サンプルEであり、自然光である太陽光基準スペクトルと併用している。図中点線 (S=100) はある一定の面積をサンプルBまたはEを用いた蛍光体コレクタのみによって覆ったときの特性である。また、一点鎖線 (S=50) はある一定の面積の50%をサンプルBまたはEを用いた蛍光体コレ

クタで覆い、残りの50%は太陽光基準スペクトルをそのまま透過させたときのものである。さらに、実線($S=0$)は太陽光基準スペクトルのみのものである。

図9は蛍光染料を用いた太陽光の光質変換の他の例である。この図では、2種類の蛍光染料サンプルB (Yellow 083)、サンプルD (Red 300)を併用している。サンプルBの蛍光極大波長は603nmである。図の実線はサンプルBとサンプルDによる蛍光体コレクタで一定面積を覆うとき、サンプルBの蛍光体コレクタの面積とサンプルDのその比を4対1にしたときのものであり、点線は同じく面積比を3対2にしたときのものである。

以上の結果より、現状のサンプルD (Red 300)の特性をそのまま長波長側に60nm程度移動させること、光合成に寄与する二つの極大波長のうち短波長側に対応する効率の良い波長変換材料を開発し、二つの変換材料を組み合わせること、自然光を併用することなどにより、太陽光基準スペクトルを上回る光エネルギー固定の達成が可能であると考えられる。

5. むすび

植物体は各々固有の光吸収特性を有している。従って、蛍光染料などによる波長変換された光と自然光を併用することにより、光合成系にとって最も高い効率の光を供給することが可能であると考えられる。今後、光合成に必要な波長分布を持つ光を効率よく供給するための波長変換材料の探索、各種材料の諸特性を含めたシステムの研究を進めていく必要がある。

なお、本論文で述べた特性を具体的に実現する蛍光体コレクタの開発も進めている。この蛍光コレクタは波長変換後の光を面全体から放出することが特徴である。現在、板の厚みを変えることや表面処理を施すことなど基礎特性を取得中である。これらの結果がまとめられ次第報告する予定である。

最後に、ご協力頂いた(株)尾関、日製産業(株)の関係各

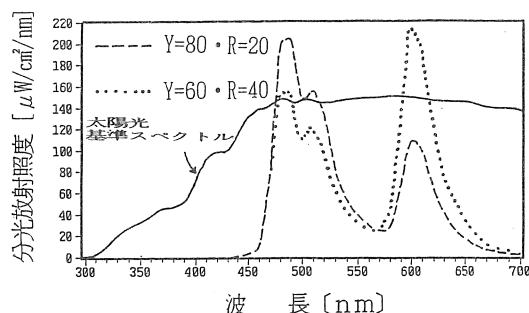


図9 蛍光染料を用いた太陽光の光質変換の1例(サンプルBとサンプルDの適用)

位に深謝する次第である。

参考文献

- 1) 谷, 奥本, 小須田: 太陽エネルギーの固定変換に関する基礎研究 電気学会全国大会No.1494 (1989.4)
- 2) J. O. Stoner Jr.: Wavelength shifters for agricultural use, Applied Optics vol.21, No.1, P15 (1982.1)
- 3) A.L. Lehninger 著 藤本大三郎他訳: 生命とエネルギーの科学 p.101化学同人 (1985年2月)
- 4) 作田: 蛍光体による太陽集光系 電子技術総合研究所 彙報 第50巻 第8号 p.9~11 (昭和61年8月)
- 5) 林原, 塚本: 蛍光体を用いた集光器, 太陽エネルギー vol.15, No.2 P.31~35 (1989年3月)
- 6) 例えば前島ほか: LSCを用いたタンデム形光電変換デバイス 電気学会論文誌 D108巻2号 p.131~135 (昭和63年2月)
- 7) 中原, 由井: レファレンスソーラーセルの屋外較正法に関する研究 電子技術総合研究所報告第842号 p.27~29 (昭和59年5月)

(平成元年4月21日 原稿受理)