論文

光合成セラミクス素子の概念とその実現性に関する 素材文化学的研究

牧 野 和 孝

Materials Culturology Discussions on The Concept of Photosynthesis Ceramics Element and Its Feasibility

by

Kazutaka MAKINO

In this paper, in order to establish a new engineering field based on the comprehensive knowledge of humanities and science, the food crisis of human beings in the near future has been taken into notice and discussed from a point of materials culturology. As a result, it has been pointed out the food crisis to be one of short term & serious problems. And, to overcome the food crisis in the near future, new concept of artificial photosynthesis system supporting the food problem of human beings has been conceptually presented. And the feasibility has been fundamentally discussed from points of materials engineering and materials culturology.

The following results has been obtained.

1) The photosynthesis mechanism of green plant was discussed from a point of materials engineering, and five conditions necessary to realize the photosynthesis are fundamentally elucidated.

2) The five conditions of 1) were shown to be satisfied by introducing the concept or $\Phi/1-\Phi$ type of pn-conjunction particle.

3) The optimum combination of photosynthesis catalysis was pointed to be AlN, SrTiO₃, Sr_{0.75}Ag_{0.25}TiO₃, GaSe, GaTe, SnS. And each photosynthesis catalysis was quantitatively designed into $\Phi/1-\Phi$ type of pn-conjunction particle.

4) New two concepts of photosynthesis ceramics element and photosynthesis system, necessary to photosynthesize glucide from CO₂, H₂O and the sunlight, were presented.

5) The area of the leaflike plane of photosynthesis system, necessary to synthesize the per capita daily consumption of glucide 250g, was pointed out to be 1.2m².

Key words : Photosynthesis Ceramics, Photosynthesis Catalysis, Photosynthesis

平成9年10月2日受付

秋田大学鉱山学部 資源・素材工学科 〒010 秋田市手形学園町1-1

Dept. of Materials Engineering for Resources, Mining College, Akita University 〒010 1-1, Tegatagakucho, Akita, Japan

はじめに

科学技術は科学および技術の総称であり、科学は自然認識の体系であり、技術は生産手段における客観性ある知識体系である。17世紀デカルト¹⁾は科学の方法に関して

1) 精神に明晰判明なもののみを真と認め、速断や先入見を排除するという明証性の規則。

2) 問題を出来るだけ多くの小さい部分に分けてもっとも単純で認識しやすい要素を見出すという分析の規則

3) 最も単純なものから最も複雑なものへ思考を順序正しく導くという総合の規則

4) 見落としがないかどうか十分に再検討するという枚举の規則
の4つの手法を提案した。

19世紀中葉ミル²⁾は帰納的方法論を重視した。以来、科学の方法は本質的には経験からの帰納であると云われてきた。しかしながら、現代諸科学は単に帰納法により構築されると見ることは不可能で、近年では仮設演繹法が科学方法論の基本的形態であると一般に評価されるようになった。

以上のことは生産手段における客観性ある知識体系である技術開発についても同様に云うことができる。しかしながら、帰納的にしろ演繹的にしろ技術が客観性ある専門知識体系を追求するあまり、技術がいかに役立ちいかなる影響をおよぼすかについての考察がなごりにされる傾向を生じてきた。つまり、技術の理系的知識が重視され、技術の人文系的知識は疎んじられ、本来の“文化としての技術”が徐々に“企業利益としての技術”へと変質させられてきた。このことが企業の理系指向と文明の理系離れという双極化現象を惹起せしめていると指摘できる。近年の青少年の理系離れはその顕在化の1つの表われであると見ることができる。

鳥のように空を飛んだりチーターのように颯爽と走ったりできれば人間の生活空間が量的にも質的にも著しく向上すると“ある人間”が考える。つまり、まず技術の価値が人文系的考察により創造される。こうして動機づけられ、1人は2人になり2人は3人となり、人々は献身的に理系的考察を行ない、長期間を費やし、ついに飛行機や自動車の開発に成功する。そして、素

材文明の新局面の主人公として空を飛び、地上を走り廻り今日に至っている。ここに技術における人文系的知識と理系的知識との本来の不可分の関係を見ることができる。

しかしながら、専門分化が進展し、企業文明があるべき状態から理系指向へと傾斜し、人文系を疎んじるにつれ“企業利益優先”という単一な価値基準が他の価値基準を駆逐しつつあり、一方、これに対抗して素材文明が理系離れを起こしつつある。

以上のことは技術に豊かな価値を復活させるために人文系と理系の総合的知識に立脚した新しい“工学”という学問体系を構築する必要があることを意味している。

国連食糧農業機関 (FAO) によれば³⁾ 1974~76年4億3,500万人いる世界の栄養不足人口が、2,000年になっても減少しないものと予測されている。これは世界の食糧生産量そのものの絶対的不足(理系的課題)というよりむしろ先進国と途上国間での食糧分配の偏り(人文系的課題)の結果であると考えられている。先進国と途上国間の食糧分配の偏りが是正されれば世界の栄養不足人口が消失するという認識である。このような状況の中で生まれたのが食糧過剰という先進国の農業問題である。

このことが先進国の食糧問題は存在しないことを意味するのであろうか。

1974~76年の世界の農用地は50億haで、陸地総面積の30数%を占めているが、その拡張は工業的開発に圧迫され容易ではない。また、世界人口は2,025年には82億人(1990年50億人)となり、一人あたりの食糧需要の増加も見込まれている。かりに一人あたりの食糧需要が現在のままで一定に保たれかつ先進国と途上国間の食糧分配の偏りが是正されるというドラスティックな仮定が満たされるとしても、穀物類、ジャガイモ、サツマイモ、大豆、砂糖などの食糧生産量は2,025年には現在の1.8倍を達成しなければならない。つまり、人類は先進国の食糧過剰と途上国の食糧不足という問題を抱えながら、ここ30年以内に少なくとも食糧生産量を現在の1.8倍に増大させなければならない。

食糧問題は資源・エネルギー問題、地球環境問題のように、100年、1,000年の計としての課題である。しかし人類にとっていまや食糧問題は30年課題として顕在化していると指摘できる。

つまり先進国の食糧問題は切迫した緊急課題である。

この克服には、次の2点すなわち1つは食糧分配の偏りの是正そして他の1つは農用地の拡張と生産力の増大が必要である。ここでさらに、前述のように前者が解決されても後者は依然として“食糧生産量を30年以内に1.8倍にする”という課題を残す。そして、この克服は基本的には農用地の拡張に依存し厳しい状況にある。

このことは農用地による食糧生産システムとは別の支援システムとしての食糧生産の技術システムの開発が重要な技術的課題となることを意味している。それは人類の食糧問題を量的にも質的にも著しく安定状態へと変革するものと考えられる。

本報では、以上の観点から、緑色植物が太陽光、二酸化炭素および水から有機化合物 (CH_2O)_n を合成する光合成メカニズムを模倣し、太陽光、二酸化炭素および水から有機化合物 (CH_2O)_n を合成する光合成セラミクス素子の概念を提出し、その実現可能性について素材物性学的ならびに素材文化化学的に考察する。

1. 植物の光合成メカニズムについて

1.1 植物の光合成の進化と発見について

35億年から40億年前地球上に生命が誕生した。その頃大気は稀薄で、主にメタン、炭酸ガスおよび水蒸気からなっていた。酸素は、地球上に存在する物質の酸化（あるいは燃焼）のため使用され尽し、大気中には存在しなかった。

地上には水があった。岩から栄養分を吸収した水が水たまりに集まる。水が蒸発するにつれて、栄養分が濃縮され豊かなスープが水たまりにできる。最初の生物はこのスープを食料源とし、それを呼吸作用により水と二酸化炭素に分解しながら消費した。こうして生命が成長するにつれて、自らの組織と機能の維持のため食し消費する欲求が生まれ、多少複雑な化合物を再合成するようになった。そして、小さな分子から大きな分子を合成するのに太陽エネルギーを使用する生物が現われた（緑色植物、藻類、紅色および緑色硫黄細菌など）。また、太陽光エネルギー以外の他の還元力を有する物質を用いて小さな分子から大きな分子を合成することを学んだ生物も現われた（硫黄細菌、硝化細菌、水素細菌、鉄細菌など）。これらの生物のように生命の建築用ブロックの作り方を知っているつま

り無機物のみの栄養で生活増殖する生物のことを自主栄養生物という。以上は植物の光合成の進化の概略である。

1780年イギリスの神学者、哲学者、化学者、植物生理学者プリーストリー⁴⁾はローソクとハツカネズミを用いた実験より緑色植物や藻の細胞が光を受けて酸素を発生することを見出した。1786年オランダの医師、植物生理学者インゲンハウス⁵⁾はプリーストリーの実験を繰返し、植物の炭酸同化作用および吸収作用を発見した。

1796年スイスの牧師スヌビエは植物において酸素が発生するには二酸化炭素の存在が必要であることを示した。また、同時期にスイスの植物生理学者ソシュールは植物に出入れする物質の定量的研究を初めて行った。そして、窒素化合物が根から吸収されること、および植物体内で二酸化炭素と水が結合することを見出した。また、植物のガス交換について定量的実験を行い、放出される酸素と吸収される二酸化炭素の量は等しく、二酸化炭素の分解と吸収の結果として植物の重量が増加することを示した。その結果次式の光合成の基本反応が明らかにされた。

1.2 植物の光合成メカニズムとその熱物理学的条件について

緑色植物の光合成は Fig. 1 に示す5つの反応すな

Fig. 1 Five fundamental reactions constructing the photosynthesis of green plant (①~④; light reaction, ⑤; dark reaction)

わち、①初期光化学反応、②酸素発生反応、③電子伝達反応、④光リン酸化反応および⑤二酸化炭素固定反応 から成り立っている。このうち①～④は明反応と呼ばれ後述の暗反応に必要なエネルギーと物質をつくりだす。一方、⑤は暗反応と呼ばれ明反応から供給されるエネルギーと物質を用いて二酸化炭素と水をブドウ糖へと変換する。

1. 2. 1 植物の光合成における明反応について^{9)~10)}

植物の光合成における明反応は葉緑体のチラコイド膜に局在する。Fig. 2にはチラコイドメンブレンにおける明反応の概念図を示してある。これによれば明反応は光学系1 (PS1) と光学系2 (PS2) から構成されていることがわかる。

チラコイドメンブレンに光が照射すると、二つの光

Fig. 2 The concept of light reaction in thylakoid membrane (Photosynthesis PS1 and PS2)

Fig. 3 Two kinds of role of light reaction in the photosynthesis of green plant
—Production of a material for fixing carbon dioxide and a energy source driving photosynthesis reaction—

学系が励起される。光学系2は水 H_2O から電子を受けとり、その電子は種々の電子伝達体の間を運ばれ、光学系1により $NADP^+$ に渡される。同時にこの電子伝達系に共役して ADP とオルトリン酸から ATP が生成される (光リン酸化)。この明反応によって得られた $NADPH$ は CO_2 の還元剤 (固定剤) として、また ATP はエネルギー源として使用される。

水 H_2O から得られた電子が $NADP^+$ まで移動する間の電子伝達系構成成分としては Fig. 2 からわかるようにマンガン蛋白質 (Mn)、結合型プラストキノン (Q, PQ)、チトクローム f (Cyt f)、プラストシニアン (PC)、結合型鉄硫黄蛋白質 (FeS)、フェレドキシン (Fd)、フェレドキシン-NADP 酸化還元酵素などである。そして光学系1 (P 700) と光学系2 (P 680) は蛋白質と結合した特別の葉緑素である。

以上からわかるように明反応では太陽光エネルギーを用いて水 H_2O より電子をとりだし、その電子により $NADP^+$ を $NADPH$ へと還元することおよびこの還元反応に共役して水 H_2O より得た水素イオン H^+ により ADP とオルトリン酸から ATP へとリン酸化することの2つの仕事が行なわれる。そして $NADPH$ は CO_2 固定のための原料の1つとして、 ATP はエネルギー源として暗反応部へと送り込まれる。

Fig. 3には植物の光合成における明反応の2つの役割を概念的に示してある。

1. 2. 2 植物の光合成における暗反応について^{11)~17)} —カルビン・ベンソンサイクル—

前節の明反応でつくられた CO_2 固定化用原料の1つである $NADPH$ ならびに CO_2 固定化反応のエネルギー源である ATP を用いて CO_2 を固定化するサイクルが暗反応である。この暗反応はカルビン・ベンソンサイクルと呼ばれる。

Fig. 4には暗反応のカルビン・ベンソンサイクルの概念図を示してある。なお、図中6, 12などの数字は分子数を、3C, 5Cなどの記号は分子に含まれる炭素数を意味している。これによればカルビン・ベンソンサイクルは出発原材料リブローズ-5-リン酸 (Ru5p) に ATP を作用させてリブローズ-1, 5-二リン酸 (RuBP) にし、その RuBP と二酸化炭素とから 3-ホスホグリセリン酸 (PGA) に変換する。そして、この PGA に ATP を作用させホスホリルホスホグリセリン酸 (HHG) とし、これと $NADPH$ と

Fig. 4 The concept diagram of Calvin Benson Cycle (Dark reaction) (No.1)

からグリセロアルデヒド-3-リン酸 (GAP) を合成する。こうして合成された GAP の6分の5が再び同一量の出発原材料 Ru5P となり、残りの6分の1が二酸化炭素固定分としてのブドウ糖となる。つまり、カルビン-ベンソンサイクルとは出発原材料 Ru5P を ATP および NADPH を用いて生成物の6分の5を循環させ、6分の1を系外に排出するという特徴を有している。

カルビン-ベンソンサイクルをさらに詳細に記述すれば Fig. 5 のようになる。これによれば前述の特徴がさらに明瞭となることがわかる。すなわち、6CO₂ (炭素数1) が6Ru5P (炭素数5) に受け取られて12GAP (炭素数3) ができる。このうち10GAP はもう一度元通の6Ru5P をつくるのに用いられ、正味の残として1分子の GAP が系外に排出される二酸化炭素の固定分となる。

以上より、植物の光合成の明反応および暗反応においてつぎのような化学反応が生じていることが指摘できる。

Fig. 5 The concept diagram of Calvin Benson Cycle (Dark reaction) (No.2)

明反応 (チコライドメンブレン, ストローマ・チラコイドメンブレン界面およびチラコイドメンブレン)

暗反応 (カルビン・ベンソンサイクル) (ストローマ内)

結局, 明反応と暗反応により次の反応が生じていることがわかる。

ここで, $(\text{CH}_2\text{O})_{6n}$ が二酸化炭素固定分としてのブドウ糖である。

式(2)から式(19)の反応サイクルは1分子のリブローズ-5-リン酸 Ru5P, 3分子のアデノシン 5'-ミリン酸 ATP, 3分子の正リン酸 Pi および 2分子の還元型ニコチン酸アミドアデニンジヌクレオチドリ酸 NADPH を出発原料として循環させて達成される。そしてこの光合成反応が実現するためにはつぎの5つの条件が必要であると指摘できる。

① カルビン・ベンソンサイクルと共役して水から水素イオン H^+ をとりだし供給できること。

② カルビン・ベンソンサイクルを駆動するに必要

な CO_2 固定用原料の1つ NADPH (式(4)) と CO_2 固定用エネルギー源 ATP (式(3)) を定常的に循環供給できること

③ カルビン・ベンソンサイクル内でリブローズ-5-リン酸 (Ru5P) を出発原料として式(5)から式(18)の反応を実現するに必要なエネルギーを供給できること。

④ カルビン・ベンソンサイクルに CO_2 と H_2O を定常的に取り組む仕組みを有すること。

⑤ カルビン・ベンソンサイクルの生成物として系外にブドウ糖を定常的に排出・貯蔵できること。

次章では上述の5つの条件を満たす光合成セラミクス解媒の概念を提出し, その実現性について素材物性学的ならびに素材文化学的に考慮する。

2. 光合成セラミクス解媒および光合成セラミクス素子の概念とその実現性に関する素材物性学的考察

本章では前述の光合成実現の5つの条件を満足する光合成セラミクス触媒の設計について素材物性学的^{(18), (19)}に検討する。そして, 光合成セラミクス触媒を用いた光合成セラミクス素子の概念を提出する。

2.1 光合成セラミクス触媒の設計について

前述の5つの光合成実現の条件のうち①の“カルビン・ベンソンサイクルと共役して水から水素イオン H^+ をとりだし供給できること”を満たすセラミクス触媒について考察する。

水から水素ガス H_2 および酸素ガス O_2 を発生させるに必要なエネルギーはそれぞれ 0.686eV および 0.571eV である。

Fig. 6 The concept of $1/1$ type of pn-conjunction particle

いま, Fig. 6 のような p 型部と n 型部の容積比 $1/1$ の pn 接合粒子 (SnO_2 , 直径 $5\mu\text{m}$, $1/1$ 型 pn 接合粒子と呼ぶ) を考えてみよう。Fig. 7 には SnO_2 の p 型部と n 型部のそれぞれの電子エネルギー帯構造を示してある。ここで両者を接合して pn 接合を構成した場合, n 型側で水素ガス H_2 が発生しない条件, つまり n 型側の自由電子の準位が水素発生エネルギー準位 0.686eV より低くなる条件は次式で与えられると指摘できる。

$$E_{\text{fn}} - \frac{E_{\text{fn}} + E_{\text{fp}}}{2} < (1.5 - 0.686)\text{eV} \quad (20)$$

一方, p 型側で酸素ガス O_2 と水素イオン 2H^+ が発生する条件, つまり p 型側の自由正孔の準位が酸素発生エネルギー準位 -0.571eV より低くなるとして,

$$\frac{E_{\text{fn}} + E_{\text{fp}}}{2} - E_{\text{fp}} < (-0.571 - (-1.5))\text{eV} \quad (21)$$

したがって, 式(20)と式(21)とを同時に満たす条件は次式で表わされることがわかる。

$$1.624\text{eV} < E_{\text{fn}} - E_{\text{fp}} < 1.858\text{eV} \quad (22)$$

Fig. 7 Electron energy band structures of p type and n type of SnO_2

Fig. 8 Electron energy band structure of $1/1$ type of pn-conjunction particle generating hydrogen ion 2H^+ and oxygen $1/2\text{O}_2$

Fig. 9 $1/1$ type of pn-conjunction particle (SnO_2) generating hydrogen ion 2H^+ and oxygen $1/2\text{O}_2$

条件式(22)は不純物準位を制御することにより可能である。その結果 Fig. 6 の $1/1$ 型 pn 接合粒子の電子エネルギー帯構造を Fig. 8 のようにすることができる。これにより $1/1$ 型 pn 接合粒子は太陽エネルギーの照射をうけて Fig. 9 のように p 型側のみに酸素ガス $1/2\text{O}_2$ と水素イオンをつくりだすことができると指摘できる。

つぎに, 光合成実現の条件②から⑤について検討してみよう。条件②および③によれば明反応の式(3), 式(4)と暗反応の式(5)から式(18)が太陽エネルギーにより起こることが必要であることがわかる。これを実現させるための幾何学的条件としてまず出発原材料としての 1 分子のリブローズ 5-リン酸 Ru5P , 3 分子のアデノシン 5'-ミリン酸 ATP , 3 分子の正リン酸 Pi および 2 分子の還元型ニコチン酸アミドアデニンジヌクレオチドリン酸 NADPH が同一空間に共役して存在しなければならないことがあげられる。これは Fig. 10 のような光合成セラミクス素子により達成されるものと考えられる。これによれば光合成セラミクス素子は a) のように光合成部, 原料供給部ならびに糖質プロダクト取出部の 3 つの要素から構成されていることがわかる。ここで原料供給部, 糖質プロダクト取出部はそれぞれ条件④および⑤を満たすと指摘できる。

Fig. 10 の 6) にはより具体的な光合成セラミクス素子の概念図を, c) には光合成部の幾何学的概念図を示してある。

さて, 条件②および③について検討してみよう。式

Fig. 10 The concept of photosynthesis ceramics element

(3)から式(18)の反応を起こすには Fig. 11 に示す太陽光のエネルギー分布 (0.5eV~4eV) を有効に取込む光触媒セラミクスの最適な組合せを決定しなければならない。

本報では以上の観点から光触媒セラミクスとしてエネルギーギャップがそれぞれ 3.8eV, 3.2eV, 2.6eV, 2.05eV, 1.66eV および 1.26eV の AlN, SrTiO₃,

Fig. 11 The spectrum of the sunlight energy

Sr_{0.75}Ag_{0.25}TiO₃, GaSe, GaTe および SnS を選択する。ただし, Sr_{0.75}Ag_{0.25}TiO₃ のエネルギーギャップ 2.6eV は量子力学ならびに群論的手法を用いて求めた。たとえば¹⁹⁾, この組合せ (エネルギーギャップ 1.26eV~3.8eV) により太陽光のエネルギーを効率 95% で取込むことができる。

仮に太陽光を効率 95% で取込んだとしても, 光触媒セラミクス粒子を Fig. 6 のような 1/1 型 pn 接合粒子として使用すれば, 光合成反応に供給しうるエネルギーは Fig. 12 のように 0.1eV (または -0.1eV) 程度の低いものになる。折角太陽エネルギーから 3.8eV という高いエネルギーを折込んでも, 供給時に 0.1eV (または -0.1eV) ではエネルギー光合成反応に有効に利用できない。

この問題を克服するために Fig. 13 のような Φ/1-Φ 型 pn 接合粒子の概念を提出する。ただし Φ は pn 接合粒子中の p 型部の占める体積分率を意味している。

Φ/1-Φ 型 pn 接合粒子において p 型部と n 型部のそれぞれの体積が互いに相違している。そのため pn 接合時のキャリア移動に起因するフェルミ準位の移動巾が相違する。つまり, フェルミ準位のキャリア濃度効果である。そのため Fig. 14 に示す p 型ならびに n 型半導体を pn 接合した際のフェルミ準位を希望値 E_i (E_m > E_i > E_{fp}) にする体積分率 Φ は次式によりもとめられる。

$$\frac{E_i - E_{fp}}{E_m - E_i} = \frac{\ln \Phi^{-1}}{\ln (1-\Phi)^{-1}}$$

Fig. 12 Electron energy band structure of $1/1$ type of pn-conjunction particle (AlN) Fig. 13 The concept of $\Phi/1-\Phi$ type of pn-conjunction particle Fig. 14 The control concept of Fermi level E_i of $\Phi/1-\Phi$ type of pn-conjunction particle Fig. 15 Electron energy band structure of $\Phi/1-\Phi$ type of pn-conjunction particle

式(3)を満たす $\Phi/1-\Phi$ 型pn接合粒子はFig. 15のような電子エネルギー帯構造をもつ。これによればn型側のみが光合成反応に有効なエネルギー E_i を供給できることがわかる。つまり、p型側が不活性となるため反応妨害(自由電子と自由正孔間)がなくなる。すなわち、 $\Phi/1-\Phi$ 型pn接合粒子は原理的に優れた触媒として機能できることが指摘できる。

この手法の特徴はpn接合時のフェルミ準位 E_i が E_{fn} と E_{fp} 間の任意の値に制御できる点にある。

さて、つぎにpn接合時のフェルミ準位 E_i を前述の領域外にも制御可能とするために、 $\Phi/1-\Phi$ 型pn接

合粒子の Φ を一定して直径のみを変化する手法を導入する。これによりキャリアー濃度効果によるフェルミ準位制御ができるからである。

ある基準直径の $\Phi/1$ - Φ 型 pn 接合粒子のフェルミ準位 E_1 とキャリアー濃度 n との間には次式の関係がある。

$$E_1 = \tau \ln n \quad (24)$$

ここで、 τ は特性エネルギー定数であり、あらかじめ求めうる。

一方、 Φ を一定にして前述の $\Phi/1$ - Φ 型 pn 接合粒子を任意の直径としたときのフェルミ準位 E_1' とキャリアー濃度 n' との間にも同様に次式が成立する。

$$E_1' = \tau \ln n' \quad (25)$$

したがってフェルミ準位の変化 $\Delta E_1 (\equiv E_1' - E_1)$ は次式ようになる。

$$\Delta E_1 = \tau \ln \frac{n'}{n} \quad (26)$$

以上より、フェルミ準位を制御する2つの手法、1つは $\Phi/1$ - Φ 型 pn 接合粒子手法、他の1つは $\Phi/1$ - Φ 型 pn 接合の直径制御手法が利用できることがわかる。

Table. 1 には前述の2つの手法を本報の6種類のセラミクスに対して適用し、設計した光合成セラミクス触媒とそれぞれが光合成反応に供給するエネルギー値を示してある。ただし、いずれのセラミクスも基準直径を 5μ 、キャリアー濃度 n を 10^{12}cm^{-3} とした。

これによれば AlN 、 SrTiO_3 、 $\text{Sr}_{0.75}\text{Ag}_{0.25}\text{TiO}_3$ 、 GaSe 、 GaTe および SnS は太陽光からそれぞれ 3.8eV、3.2eV、2.6eV、2.05eV、1.66eV および 1.26eV のエネルギーを取込み、光合成反応へそれぞれ 1.8~3.2eV、1.5~2.5eV、1.2~2.0eV、0.95~1.55eV、0.73~

Table. 1 The particle design of photosynthesis ceramics catalysis

a) 光合成セラミクス触媒 AlN

太陽光から取り込むエネルギー (eV)	3.8eV							
$\Phi/1$ - Φ 型 pn 接合粒子	p 型部の占める体積分率 $\Phi=0.042$							
光合成反応へ供給するエネルギー (eV)	3.2 eV	3.0 eV	2.8 eV	2.6 eV	2.4 eV	2.2 eV	2.0 eV	1.8 eV
粒子径 (μ)	0.014 μ	0.032 μ	0.074 μ	0.17 μ	0.44 μ	0.92 μ	2.15 μ	5.0 μ

b) 光合成セラミクス触媒 SrTiO

太陽光から取り込むエネルギー (eV)	3.2eV					
$\Phi/1$ - Φ 型 pn 接合粒子	p 型部の占める体積分率 $\Phi=0.049$					
光合成反応へ供給するエネルギー (eV)	2.5 eV	2.3 eV	2.1 eV	1.9 eV	1.7 eV	1.5 eV
粒子径 (μ)	0.032 μ	0.088 μ	0.24 μ	0.66 μ	1.81 μ	5.0 μ

c) 光合成セラミクス触媒 $\text{Sr}_{0.75}\text{Ag}_{0.25}\text{TiO}_3$

太陽光から取り込むエネルギー (eV)	2.6eV				
$\Phi/1$ - Φ 型 pn 接合粒子	p 型部の占める体積分率 $\Phi=0.057$				
光合成反応へ供給するエネルギー (eV)	2.0 eV	1.8 eV	1.6 eV	1.4 eV	1.2 eV
粒子径 (μ)	0.033 μ	0.11 μ	0.40 μ	1.43 μ	5.0 μ

d) 光合成セラミクス触媒 GaSe

太陽光から取り込む エネルギー (eV)	2.05 eV			
$\Phi/1-\Phi$ 型 pn 接合粒子	p 型部の占める体積分率 $\Phi=0.067$			
光合成反応へ供給する エネルギー (eV)	1.55 eV	1.35 eV	1.15 eV	0.95 eV
粒子径 (μ)	0.04 μ	0.21 μ	1.03 μ	5.0 μ

e) 光合成セラミクス触媒 GaTe

太陽光から取り込む エネルギー (eV)	1.66 eV		
$\Phi/1-\Phi$ 型 pn 接合粒子	p 型部の占める体積分率 $\Phi=0.075$		
光合成反応へ供給する エネルギー (eV)	1.08 eV	0.88 eV	0.73 eV
粒子径 (μ)	0.13 μ	1.06 μ	5.0 μ

f) 光合成セラミクス触媒 SnS

太陽光から取り込む エネルギー (eV)	1.26 eV		
$\Phi/1-\Phi$ 型 pn 接合粒子	p 型部の占める体積分率 $\Phi=0.099$		
光合成反応へ供給する エネルギー (eV)	0.78 eV	0.68 eV	0.53 eV
粒子径 (μ)	0.13 μ	0.56 μ	5.0 μ

1.08eVおよび0.53～0.78eVのエネルギーを自由電子をキャリアーとして供給できることを意味している。このことはまた前述の6種類のセラミクス粒子を表面積基準でそれぞれ一樣になるよう秤量・調合すれば、太陽光エネルギーの95%を取込み (Fig. 16の斜線部), それをFig. 16の実線により示される分布をもつエネルギーへと変換できることがわかる。この変換エネルギーは、太陽光エネルギーの88%に相当し光合成反応に有効に利用される。これにより条件②および③が達成できる。

所定量の出発原材料 Ru5P, 2NADPH, 3ATPおよび3Piを封入したFig. 10 c)の光合成セラミクス素子により条件②および③は実現される。

2.2 光合成セラミクス素子を用いた光合成システムに関する素材文化学的考察

本章では本報で提出した光合成セラミクス素子を用

いた光合成システムについて素材文化学的²⁰⁾に考察する。

光合成システムは基本的にはFig. 10 c)のような光合成素子を2次元的に配列した葉状面を主要部とするFig. 17 a)の構造となるものと考えられる。これによれば光合成システムは一枚の木の葉のような形で、太陽光エネルギーを取込む葉状部、H₂O, CO₂供給部、光合成システムを支持する主軸部および糖質プロダクト貯蔵部の4要素から構成されていることがわかる。そして、光合成システムの戸外での配置はFig. 17 b)のようになるものと予想される。

人間一人の一日あたりの糖質摂取量250gを光合成に必要な葉状面積Aについて検討してみよう。

さて、緑色植物の光合成の太陽光エネルギー利用比 ϕ は次式で定義される。

Fig. 16 The take in energy and the supply energy of $\Phi/1-\Phi$ type of pn-conjunction photo-synthesis ceramics catalysis particle

Fig. 17 The concept diagram of photosynthesis system using photosynthesis element

$$\phi_0 = \frac{\text{光合成に用いられるエネルギー}}{\text{吸収されたエネルギー}} \times 100 (\%)$$

(27)

測定結果によれば、利用比 ϕ_0 は赤色光（主波長660 nm）に対して59%，緑色光（主波長546nm）に対して44%および青色光（主波長436nm）に対して38%である。これらの値を用いて1モルの CO_2 を同化するのに必要な光量子数をもとめると赤色光、緑色光および青色光に対してそれぞれ4.1モル光量子、4.3モル光量子および5.1モル光量子となる。したがって、1分子の CO_2 を同化するために4.5個の光量子が必要であると考えることができる。

ここで、1日の照射時間を7時間、利用比 ϕ_0 を緑色植物のその5分の1の5%として光合成システムが1日あたり糖質分250gを合成するのに必要な葉状面積Aは 1.2m^2 と指摘できる。

結言

本報においては、総合的知識に立脚した新しい工学の学問体系を確立するという観点から、近未来における人類の食糧問題を考察し、それが短期的でかつ緊迫した問題であることを指摘した。そして、この食糧問題を克服するための支援として光合成システムの問題を提出し、その実現可能性について素材物性学的ならびに素材文化学的に考察し以下の知見を得た。

1) 植物の光合成メカニズムの素材物性学的特徴を明らかにし、その光合成実現のための5つの条件を具体的に示した。

2) 1) の光合成実現のための5つの条件を $\Phi/1-\Phi$ 型pn接合粒子の概念により満たすことができることを明らかにした。

3) 光合成触媒セラミックスの組合せとしてAlN, SrTiO_3 , $\text{Sr}_{0.75}\text{Ag}_{0.25}\text{TiO}_3$, GaSe, GaTe, SnSが適当であることを指摘し、それぞれの光合成触媒セラミックスに対して粒子設計を具体的に示した。

4) CO_2 , H_2O から糖質プロダクトを光合成するのに必要な光合成セラミックス素子ならびに光合成システムの概念を提出した。

5) 人間一人の一日あたりの糖質摂取量250gを合成するのに必要な光合成システムの葉状面積が 1.2m^2 であることを指摘した。

以上、本報においては光合成システムの概念を

素材文化化学的に提出したが、今後さらにその実現可能性について系統的に検討することが望まれる。

引用文献

- 1) デカルト；世界の思想1“近代思想のめざめ”，167～204（河出書房新社，1965）
- 2) ミル；世界の思想6“イギリスの近代政治思想”，173～399（河出書房新社，1965）
- 3) 世界大百科事典，14-74（平凡社，1993）
- 4) Priestly, J.；世界大百科事典，25-164（平凡社，1993）
- 5) Ingenhousy, J.；世界大百科事典，3-164（平凡社，1993）
- 6) 藤 茂宏；光合成，1～155（東京大学出版会，1983）
- 7) 石田政宏；葉緑体の分子生物学，1～120（東京大学出版会，1987）
- 8) ハーバート・G・ベイカー（阪本，福田訳）；植物と文明，1～268（東京大学出版会，1979）
- 9) 紫田承二，山崎幹夫；植物成分の生合成，1～213（東京化学同人，1977）
- 10) Hill, R. et al.；Nature, **190**, 136 (1960)
- 11) 西田晃二郎；光合成の暗反応，1～108（東京大学出版会，1986）
- 12) Calvin, M., et al.；Experimentia, **8**, 445 (1952)
- 13) Bassham, J. A., et al.；J. Am. Chem. Soc., **76**, 92 (1954)
- 14) 松中昭一，他；雑草研究，**22**, 133 (1975)
- 15) Decker, J. P.；Plant Physiol., **30**, 82 (1955)
- 16) Decker, J. P.；J. Sol. Ene. Sci. Eng., **1**, 30 (1957)
- 17) 村田吉男，他；植物生理学2，150（朝倉書店，1981）
- 18) 牧野和孝；エレクトロセラミクス素材物性学，1～207（日刊工業新聞社，1992）
- 19) 牧野和孝；エレクトロセラミクス素材設計学，1～232（日刊工業新聞社，1992）
- 20) 牧野和孝；素材物性学雑誌，Vol. 10, No. 1, 32 (1997)