

太陽光エネルギー有効利用技術の進展 — 太陽炉及び太陽光発電における光学技術 —

浅川 久志*¹ 若木 守明*²

Development of Technologies to Utilize Solar Energy -Optical Technologies for Solar Furnace and Solar Cell Systems-

by

Hisashi ASAKAWA*¹ and Moriaki WAKAKI*²

(Received on Nov. 14, 2012)

Abstract

Nowadays, human activities in industry and daily life are based on the huge consumption of fossil energy. Fossil fuel reserves are finite and will run out in future. Furthermore, the CO₂ gas generated by the burning of fuel causes numerous serious problems such as air pollution and global warming. On the other hand, solar, geothermal and ocean tidal energies are considered as the major natural energy sources available at the surface of the earth. The total solar energy on the surface of the earth is 1.75×10^{17} W (5.52×10^{24} Joule per year), which corresponds to the unit area light power of ca. 1 kW/m². The total energy consumed by human in one year could be supplied within an hour if we could utilize the entire energy available on the earth. The replacement of the fossil energy will be possible by the effective harnessing of this energy. In this review, recent developments of two typical utilizations of solar energy are reviewed. One is the system to transform solar energy to heat and the other is to transform it to electric energy. Optical technologies designed to enhance the efficiency of these applications are also introduced and several examples of such optical systems are given using optical simulations.

Keywords: Solar Energy, Solar Cell, Solar Furnace, Photovoltaic System, Optical Design

1. はじめに

現在の産業活動や豊かな人間活動は、大量の化石燃料の消費の上に成り立っている。この化石燃料エネルギーは、昨今オイルピーク論が議論されているように有限であり、将来的に枯渇する懸念がある。それに加えて、化石燃料を消費する際に発生する二酸化炭素による地球温暖化や大気汚染などの地球環境問題、産油国の政情、価格の高騰などの問題を引き起こしている。我々が生活している地球では、経済(Economy)の発展に際して、資源やエネルギー(Energy)の消費が不可避であり、結果として環境(Environment)を破壊する方向に作用してしまう。この3Eのトリレンマの調和を計り、持続可能な社会を目指す必要がある。

1次エネルギー資源には太陽、水力、風力、潮汐力、地熱、波浪、バイオマス等の再生可能エネルギー、石炭、石油、液化天然ガス等の化石燃料、核燃料の原子力エネルギーがある。従来の再生不可能で環境に対する高負荷の資源エネルギーから、環境負荷の小さい持続可能な資

源エネルギーへの転換が注目されている。再生可能エネルギーの中でも、化石燃料の代替として特に太陽光エネルギーの利用が最も有力視されている。太陽から得られる光エネルギーや熱エネルギーを変換し、力学的エネルギーや電気エネルギーおよび化学エネルギーとして利用することが可能である。

我々が生活する地球表面における主な自然エネルギー源としては、太陽放射エネルギー、地熱エネルギー、潮汐エネルギーの3つが挙げられる。Fig. 1に示すように1秒間に地上に入射する太陽光エネルギーは約1 kW/m²である。地球の投影面積 S は地球の半径が 6.378×10^6 m であるから、 $S = \pi \times (6.378 \times 10^6)^2 = 1.28 \times 10^{14}$ m² となり、地球が1秒間に受け取るエネルギー E は、 $E = 1.37 \times 1.28 \times 10^{17} = 1.75 \times 10^{17}$ J となる。1年間では $t = 365 \times 24 \times 3600 = 3.1536 \times 10^7$ s を掛け、 5.52×10^{24} J となる。そのうち30%は雲等で反射されるので実際利用可能なエネルギーは 3.86×10^{24} J 程度である¹⁾。

人類が1年間に消費するエネルギーは2009年の段階で 1.12×10^{10} toe (原油換算エネルギー、1toe は 1.163×10^7 W・h) であるため人類が1年間で消費するエネルギーは 1.30×10^{17} W・h となり、人類が消費するエネ

*1 丸茂電機株式会社

*2 工学部光・画像工学科 教授

ルギー全てを地球に到達する太陽エネルギー約1時間程度で賄うことができる。このエネルギーを有効に使用することが出来れば、十分現在の化石燃料エネルギーの代替となり得る。

また、代表的な太陽光の利用として現在では太陽電池が注目されているが、従来日本ではため池や温水器などの熱エネルギーとしての利用も一般的である。

本報告では太陽光エネルギーの利用という観点で、太陽熱としてエネルギーを利用する方法と、光エネルギーを電気エネルギーとして利用する方法についての変換技術の進展について解説する。

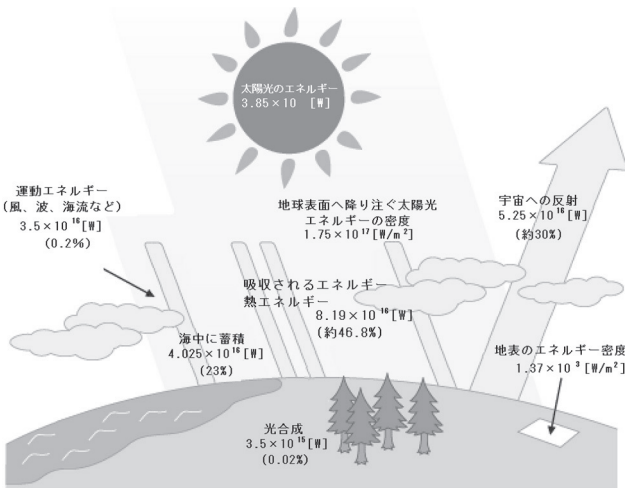


Fig. 1 太陽光エネルギーの地球上での収支

2. 太陽エネルギー活用の歴史

太陽エネルギーは古代より様々な目的に活用されてきた。人類は早くから太陽光の光を集めることで火を熾すことができるを知っていたようである。



Fig. 2 オリンピックの採火式²⁾

エジプトやメソポタミア文明等の古代文明においては、太陽からの清浄な炎として、太陽光の光を集めて採火し神事に用いていたようだ。現在でもオリンピックの聖火は、古代五輪が開かれたギリシャ中部オリンピアの遺跡

で採火され、Fig. 2のように太陽光線を凹面鏡で集める伝統的な手法で行われる²⁾。また天才学者アルキメデスの逸話として、2世紀の著述家ルキアノスは紀元前214年 - 紀元前212年のシラクサ包囲の際に、Fig. 3に示すように、海岸に複数の鏡を並べて放物面反射器として用いて、反射させた太陽光線を敵艦に集光させ火災を起こしたと記している。実際には、敵艦は海上を移動しており火災を起こすことは困難とされるが、現代でも様々なグループが再現実験を試みている³⁾。太陽エネルギーは、古代より魅力あるエネルギーとして人々に受け入れられていたと言える。

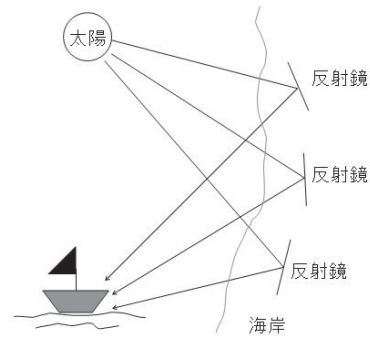


Fig. 3 「アルキメデスの燃焼鏡」原理

3. 太陽熱エネルギーの利用 -太陽炉-

歴史に残されているように太陽光を集めて、その熱を利用する形態は古くから用いられてきた。太陽光を集める方法はシンプルであり、エネルギーを高効率に利用できることや、他の元素との反応がなくクリーンな熱源として利用できる長所を持つ。

太陽からの光を熱エネルギーとして利用する太陽炉は、太陽熱発電、熔融実験、着火、調理として幅広い用途に使用されている。熔融実験の例としては、ラボアジェが1774年に入射径直径1m以上で2枚構成のレンズを用いてダイヤモンドの熔融実験を行い質量保存則の確認をしたことが有名である⁴⁾。

太陽炉においては、太陽からの光を効率よく利用するために、光学系がきわめて重要になる。太陽炉の種類を光学系で分別すると、レンズを用いた屈折集光方式と反射鏡を用いる反射集光方式に分けられる。現在の太陽炉を例に挙げ、代表的な光学系を紹介する。

レンズを用いた屈折集光方式の例として、Fig. 4に若狭湾エネルギー研究所に設置されているフレネルレンズ式太陽炉を示す⁵⁾。レンズ面の大きさは、縦3.3m、横3.3mであり、3000°C以上の超高温を作り出す10KW級大型太陽炉である。焦点の大きさは約30mmであり、太陽自動追尾制御装置を持つ。主には、太陽熱エネルギーの利用技術の開発、太陽熱を用いた新材料の開発、そし

てクリーンな熱源として高温物性の研究に使用される。Fig. 5 にフレネルレンズ式太陽炉構造を示す。太陽エネルギーをより多く利用するには、レンズを大口径にする必要がある。フレネルレンズが用いられるのは、通常の凸レンズと同じ焦点距離でありながら、薄型で作製でき、省資源・軽量を可能にするためである。

フレネルレンズは太陽光の放射角度に合わせて、レンズの方位角・仰角を制御し、反応場を焦点位置に一致させる。その上で、入射した太陽光はフレネルレンズによ

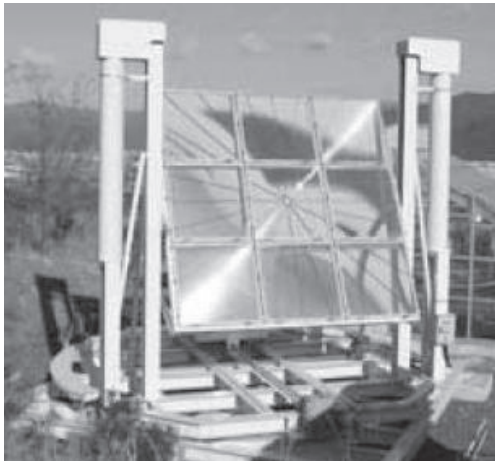


Fig. 4 フレネルレンズ式太陽炉
(若狭湾エネルギー研究センター)⁵⁾

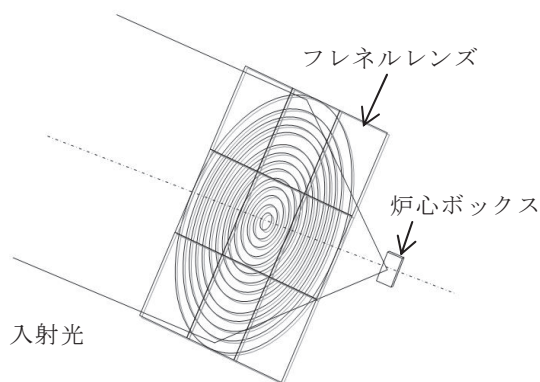


Fig. 5 フレネルレンズ式太陽炉構造

り炉心ボックスに集光し、炉心ボックス内に設置された試料を熱する構造となっている。

一方、反射鏡を用いる反射集光方式の例として、Fig. 6 にフランス国立太陽エネルギー研究所のヘリオスタット型太陽炉を示す^{6) 7)}。直径が 50 m、焦点距離が 18 m の放物面鏡で、約 130 m 先の 1840 m 四方の領域に設置したヘリオスタット群 63 基 (反射鏡は約 9600 枚) の反射を受けて温度約 3500°C の高温を作り出す 1000 KW 級の超大型太陽炉である。主には、高温材料の開発に使用されている。小規模の反射集光方式では、反射鏡は小口径の単鏡から構成され方向をかえる直達式がある。しかし、大規模になると、ヘリオスタット型と呼ばれ平面鏡を放物面鏡の形状に相對するように複数台設置し、放物面の中心部分に建てたタワーに集光する方式⁸⁾のように、平面鏡と放物面鏡を組み合わせる方式が一般的である。Fig. 7 にヘリオスタット型太陽炉の構造を示す⁹⁾。ヘリオスタット群の各平面鏡は太陽を追尾し、太陽光を放物面鏡に向かって反射させ、光軸が水平の放物面鏡はヘリオスタット群からの反射光を焦点位置に集光する構造をとる。

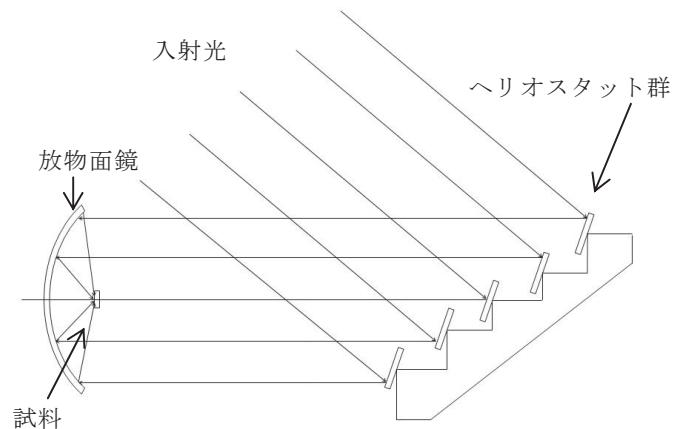


Fig. 7 ヘリオスタット型太陽炉構造



Fig. 6 フランス国立太陽エネルギー研究所のヘリオスタット型太陽炉⁷⁾

現在、太陽炉の用途は主に高温物性の研究、高温材料の開発に使用されている。今後はその成果を利用し、産業目的への展開が望まれている。

4. 太陽光発電

太陽光の電氣的エネルギーへの利用では、太陽光発電がもっとも一般的である。太陽光発電は太陽からの光エネルギーを直接電気エネルギーに変換するシステムであるが、そのエネルギー変換効率は太陽熱温水器等熱エネルギーへの変換効率が50%以上であるのに比べやや下回る。熱エネルギーを熱エネルギーとして利用すれば変換効率という点では優れているが、エネルギーを有効に利用しようとするとき電気エネルギーへ変換することが汎用性に優れている。

4.1 太陽電池の種類

太陽電池はTable 1にまとめたとおりSi系、化合物系、有機物系、色素増感と大きく4つに分けることができる。Si系と化合物系はさらに細分化されている。種類により様々な特徴を持ち、変換効率も異なる。変換効率の向上の変遷を種類別にFig. 8に示す¹²⁾。

4.2 Si系太陽電池

Si系太陽電池には結晶SiとアモルファスSiの方式がある。Siはフォノンの助けを借りることでバンド間遷移が可能な間接遷移型半導体である。間接遷移の光吸収は弱いため、太陽電池には厚い材料が必要となる。一般に半導体デバイスに使用されるSiの純度は極めて高いが、太陽光発電に使用される半導体のSiの純度は比較的低い。純度を下げると変換効率が下がるが価格が安くなるというメリットがある。太陽光発電用のセルとしては、現在は結晶Si太陽電池が主流であり、太陽電池のおよそ9割を占めている。ところが今後の発電効率の大きな向上は困難であると言われている。結晶Si太陽電池では効率27%程度が限界である。CIS(銅インジウムセレン)系においても限界効率は23.5%程度である¹³⁾。

4.2.1 結晶シリコン

結晶Siには単結晶Siと多結晶Siが存在し、それぞれ特徴が異なる。単結晶Si太陽電池は古い歴史を持ち、光により電気が発生する現象自体は1839年に報告されている。最初の太陽電池は1954年に作られた単結晶Si太陽電池である。チョクラスキー法により、Siを溶かした炉に種となる結晶Siを入れ、低速で成長させたSiの単結晶が用いられる。その為結晶全体にわたって配列の規則性が保たれた一つの結晶となっており、キャリアの再結合が少なく変換効率が高いという特徴を持つが価格も高い。多結晶Si太陽電池は材料全体が多数の結晶粒か

らなっており、結晶粒内部の規則性は保たれているが粒同士の包囲関係は不規則である。トランジスタ等の電子デバイスでは、面内でキャリアを動かすため、粒界がキャリアの動きを妨げることを無様単結晶を用いなければならないが、太陽電池では結晶粒に垂直方向にキャリアを流すので、粒界があっても太陽電池の光起電力にあまり大きな影響を与えない。一般の半導体製造過程で出たシリコンの端材や不良品を材料に製造されるため、変換効率は単結晶ほど高くはないものの、単結晶シリコンに比べると安価であることから太陽光発電に使用される中で最も多く用いられている。

Table 1 太陽電池の種類と特徴^{10) 11)}

太陽電池の種類	現状の変換効率(%)		モジュールコスト*	省資源	特徴		
	モジュール	セル					
化合物系	III-V族系	36.1	41.6	△	超高効率高コスト 宇宙用 資源問題に難		
	II-VI族系	10.9	16.7	△	中効率低コスト 大量生産向き Cdの使用などが問題		
	CIS・CIGS系	13.6	20	○	中効率低コスト 省資源 大面積高効率に難		
シリコン系	結晶系	単結晶	22.7	24.5	2.05	△	高効率高コスト 安定 Si材料の多消費に難
		多結晶	17	20.4	1.82	△	比較的高効率 家庭用としても多く普及 材料供給に難
	アモルファス系	10.4	20	1.37	○	中効率低コスト 省資源 大面積高効率に難	
有機系	色素増感系	8.5	11.2	0.75-3.3	○	中効率低コスト 省資源 液体使用、光劣化に難	
	有機薄系	3.5	7.9	1-2.84	○	中効率低コスト 省資源 変換効率や寿命に難	

*ピークパワー1Wあたりのモジュールコストを米ドルで表したものを

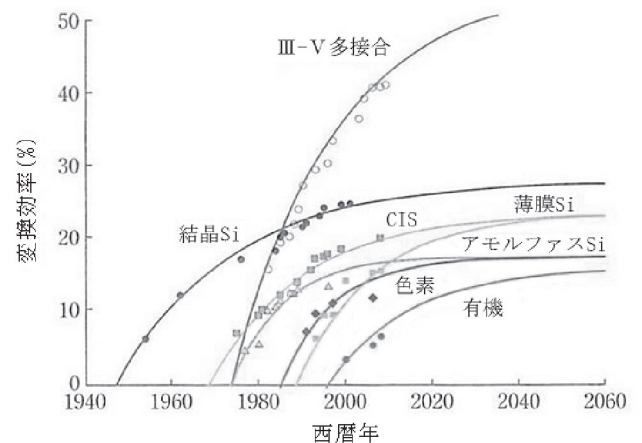


Fig. 8 各種太陽電池の光電変換効率向上の変遷と今後の予想曲線¹²⁾

4.2.2 アモルファスSi

アモルファスSi太陽電池のアモルファスは非晶質、非結晶を意味し、アモルファスSiの原子配列は規則正しい原子配列を持つ結晶Siとは異なり、不規則である。そのため結晶Siに比べ光と格子の相互作用が大きく、より多くの光を吸収することが出来る。従って、アモルファス

Si 太陽電池では薄膜化が可能で、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の膜厚で発電することが可能である。また、金属やプラスチックを基板として用いることで多くの可能性を持つ太陽電池であると言える。更に結晶 Si とアモルファス Si の2つの方式の特徴を併せ持つハイブリッド型も存在する。特徴としては温度特性が挙げられ、通常のシリコン太陽電池は温度が上昇すると変換効率が下がるというデメリットがあるが、ハイブリッド型では温度上昇による変換効率の低下はわずかである。高温となる夏場でも十分な変換効率が期待できる。

4. 3 化合物系

化合物半導体にはⅢ-V族化合物系とⅡ-VI族化合物系、CIS・CIGS系という種類に分けられ、薄膜を層状に成膜し高い変換効率を示す。

4. 3. 1 Ⅲ-V族化合物系

Ⅲ-V族というのはAl, Ga, InなどのⅢ族の物質とN, P, AsなどのV族の物質の化合物を指す。高効率のⅢ-V族化合物半導体太陽電池は2接合、3接合のタンデム構造をもつ。例をFig. 9¹⁴⁾に示す。Ⅲ-V族の物質は結晶構造が同じで格子定数も近いので、混晶が作りやすい。混晶は混ぜた2つの金属の組成比によって格子定数とバンドギャップが決まり、その物理的性質を様々に変えることが可能である。また、多接合化することで変換効率50%以上が可能となると考えられている。多接合の半導体の研究は1960年頃から進められてきた。従来は太陽光を分光し、分光した光を各セルに入射させる方法を採用していたが、AlGaAs/GaAsの2接合太陽電池を実現し¹⁵⁾、その後多接合化が進んでおり40%以上の効率が実現されて来ている。

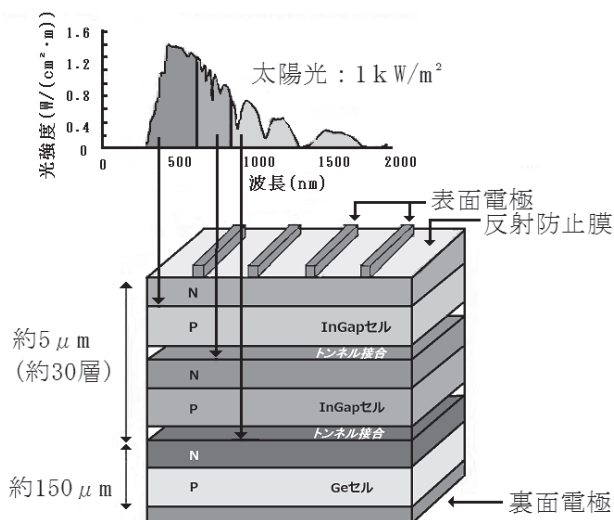


Fig. 9 接合型太陽電池の構造¹⁴⁾

多接合半導体太陽電池セルは現在のところ結晶 Si 製のセルと比較すると高価であるため、セルの使用量の低

減がコストダウンの大きなウエイトとなる。セルの使用量を低減する方法としては、光学デバイスを用いて太陽光を集光しエネルギー密度を上げた状態でセルを使用することでコストに対して最もウエイトが大きいセルの使用量を低減することが可能となる。Ⅲ-V族化合物太陽電池として知られる GaAs 太陽電池はガリウム(Ga)とヒ素(As)を原料とした化合物半導体太陽電池で単接合セルでは最も高い変換効率を発揮する。GaAs のバンドギャップはシリコンよりも大きく、電子移動度はシリコンと比較し高い。ほかの化合物半導体太陽電池と異なり高価であるが、変換効率の高さと宇宙放射線に対する劣化が少ないため人工衛星等に使用される。LED 等で注目を浴びているⅢ-V族化合物半導体を利用した太陽電池が今後期待されている。

4. 3. 2 Ⅱ-VI族化合物系

Ⅲ-V族化合物と同様に、Ⅱ族とⅥ族を組み合わせても共有結合性の半導体を作ることが可能である。構造が単純であるため作製プロセスもシンプルであり、大量生産に向いている。代表的なⅡ-VI族化合物としては CdTe 太陽電池が知られている。カドミウム(Cd)とテルル(Te)を原料とした化合物半導体太陽電池で、高効率かつ低コストの太陽電池として欧米で急速に普及が進んでいる。光吸収が急峻に立ち上がる直接遷移型半導体である。バンドギャップが比較的広いため、理論的に最も高い変換効率が期待される。有害物質である Cd を原料とするため参入企業は少なく、環境事業を手がけながら企業イメージ悪化のリスクに繋がるという理由で事業を中断する企業も多い。

4. 3. 3 CIS・CIGS系

CIS 太陽電池は銅(Cu)、インジウム(In)、セレン(Se)を原料とする化合物半導体系太陽電池で、CIGS 太陽電池は先の3つの元素にガリウム(Ga)を加えた4元素からなる化合物半導体太陽電池である。CIS 太陽電池やCIGS 太陽電池はガラス等の基材に半導体の薄膜を形成して製造する。直接遷移型半導体で、光吸収係数はシリコン系太陽電池のおよそ100倍である為、太陽電池の膜層は非常に薄い。従って少ない資源で製造することが可能であり、製造速度も高められることから生産性に優れ、結果として低コスト化に繋がる。光吸収層は化学的に安定しており、強アルカリや酸性雨に晒されても溶解しないことに加え、変換効率も比較的高いため、今後新規参入企業による生産拡大や普及が期待される太陽電池の一つである。

4. 4 有機系

有機化合物は一般に絶縁物であるが、例外として導電性をもつものが存在する。その導電性をもつものの中に半導体の性質をもつ物質があり、それらを有機半導体と呼ぶ。無機半導体の p 型に相当する電子受容体と、n 型

に相当する電子供与体があり、両者を組み合わせて太陽電池を作る。溶液の塗布や印刷によって簡単に大面積の薄膜を安価で製造することが可能である。

4. 5 色素増感太陽電池

酸化チタンは光触媒としても用いられる半導体であるが、可視光をほとんど吸収しない無色透明な半導体であるため、このままでは太陽電池にはならない。そこで酸化チタンの表面に色素分子を吸着させることで、色素に可視光を吸収させて生成した電子とホールを利用して発電する。低コストではあるが湿式であるため液漏れによる劣化が課題となっており、さらに色素として用いるルテニウム錯体の資源問題も抱えている。色素や酸化チタンの形状などを工夫することで高効率を目指す研究が行われている。また電荷蓄積電極を設けて蓄電機能をもたせエネルギー貯蔵型色素増感太陽電池の研究もされている^{16) 17)}。

5. 変換効率向上用太陽光集光システム

5. 1 現在使用されている代表的光学システム

太陽光エネルギーの変換効率向上のために、多くの太陽電池が開発されている。しかし電池のみで飛躍的に効率を向上させることには限度がある。そこで、電池の変換効率を促すシステムとして、レンズや反射鏡などの光学デバイスを用いた集光技術を組み合わせた太陽電池が開発されている。光学デバイスを用いた集光技術は、太陽電池の変換効率向上に加え、太陽電池材料使用量の飛躍的削減が可能で、省資源化、低コスト化が期待できる。Fig. 10 に示すとおり、集光系を用いた場合の変換効率は非常に高い¹⁸⁾。

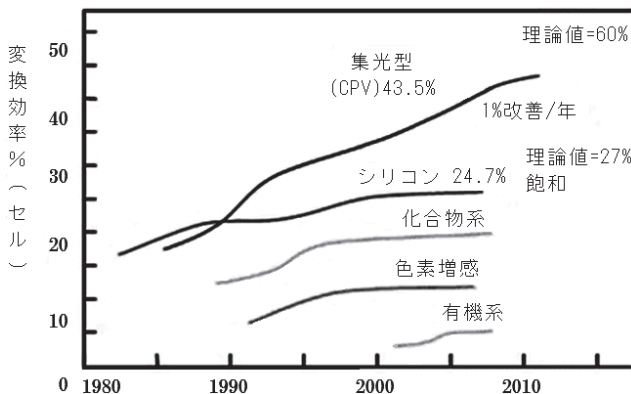


Fig. 10 各太陽電池と集光型の変換効率の比較¹⁸⁾

現在使用されている太陽光を集光する代表的な方式として、フレネルレンズ系、カセグレン系およびトラフ式の3つの光学系を紹介する。Fig. 11 に示すフレネルレンズ系は、フレネルレンズ及びロッドレンズから構成される¹⁹⁾。フレネルレンズは、通常のレンズを同心円状の領

域に分割し平面状に並べており、薄いことが特徴である。方式としては、フレネルレンズに集光された太陽光をロッドレンズにより均一化し太陽電池セルに照射する。フレネルレンズを平型からドーム型にすることにより集光効率を高めたモジュールもある。Fig. 12 は山梨県北杜市にあるNEDOの大規模実証サイトの追尾型集光太陽電池モジュール（シャープ製）を示す²⁰⁾。

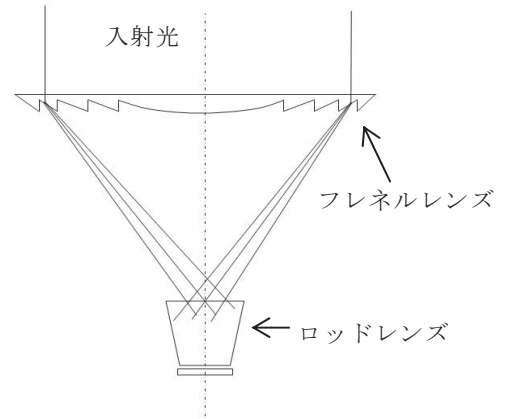


Fig. 11 フレネルレンズ系集光システム構成

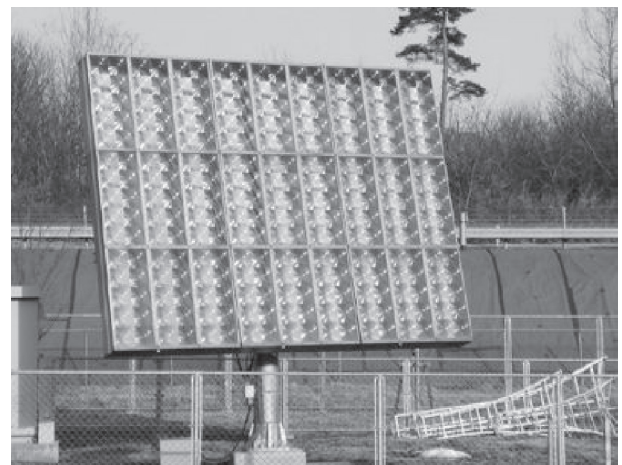


Fig. 12 フレネルレンズ系太陽電池²⁰⁾

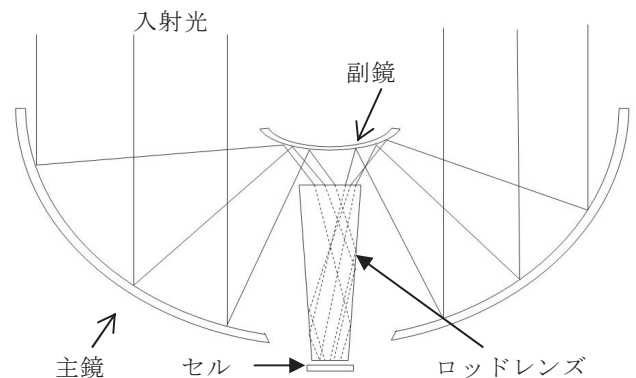


Fig. 13 カセグレン系集光システム構成

Fig. 13 に示すカセグレン系は、2枚の反射鏡及びロッドレンズから構成される。方式としては、主鏡である凹

面鏡で太陽光を反射し、次の副鏡で2次集光し、3次集光のロッドレンズにて均一化し、太陽電池セルに照射する²¹⁾。この方式を用いたカセグレレンズ系もある。

Fig. 14にアメリカ合衆国セントルイスに設置されたカセグレレン系集光太陽電池モジュールを示す²¹⁾。



Fig. 14 カセグレレン系集光太陽光発電システム²¹⁾

Fig. 15 に示すトラフ式太陽熱発電は、曲面鏡と液体を含むパイプから構成される。方式としては、曲面鏡を用いて、鏡の前に設置されたパイプに太陽光を集光させ、パイプ内を流れる液体（オイルなど）を加熱し、その熱で発電する。Fig. 16 にドイツの航空宇宙センターにあるトラフ式太陽熱発電システムを示す²²⁾。

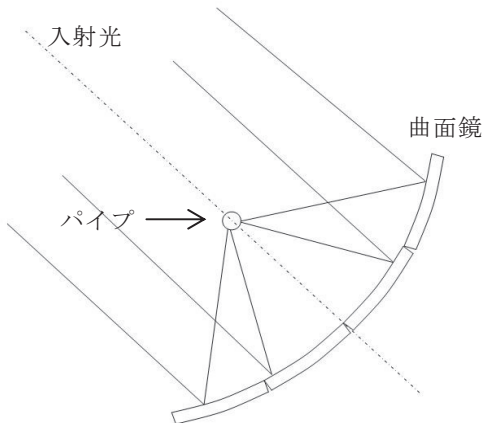


Fig. 15 トラフ型集光システム構成



Fig. 16 トラフ式太陽熱発電システム²²⁾

5. 2 集光型太陽光発電の光学系の設計

太陽光発電システムのコストダウンを図るためには、セルの使用量を低減する必要がある。光学デバイスを用いて太陽光を集光しエネルギー密度を上げた状態でセルを使用することでコストに対して最もウエイトが大きいセルの使用量を削減することが可能となる。光学デバイスの基本的な構成は、太陽炉と同様で大きく分けるとレンズを用いて集光する方法と反射鏡を用いる方法がある。光学デバイスにより効率を向上させるためには、光線の収差を抑えることが重要である。収差とは理想的な結像からのずれをいい、ザイデルの5収差（球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲、歪曲）がよく知られている。ザイデルの5収差は、口径と画角の関係から Table 2 のように関連づけられている。収差は当然口径が大きくなれば大きくなり、また画角が大きくなっても悪化する。

Table 2 口径、画角と収差との関連

大 ← 口径の影響 → 小			
小 ← 画角の影響 → 大			
球面収差	コマ収差	非点収差 像面湾曲	歪曲

太陽光発電用の集光光学系の場合、太陽の視野角は半角で 0.27° と小さいのに対して口径が大きな光学系が多いためザイデルの収差では球面収差とコマ収差が最も大きな影響を与える。ここで球面収差とは物体の光軸上の点から光学系に入射した光が1点に集まらないものであり、コマ収差は物体の光軸外からの光が1点に集まらず外側や内側にフレアのように広がってしまう収差のことを表す。またレンズを用いた屈折型の光学系においては、光の波長によって材料の屈折率が異なるために発生する色収差の影響もある。そのため、集光型太陽電池で使用する場合は一般的にはセルに入射する光を均質化するためホモジナイザを利用するためホモジナイザ入射面に対して光束が有効に入るような光学系を採用することが多い。

例えば、単レンズで口径 240 mm、焦点距離 230 mm の球面レンズを用いて設計を行った場合 Fig. 17 のような構成となるが、球面収差が非常に大きく、補正が必要となる。

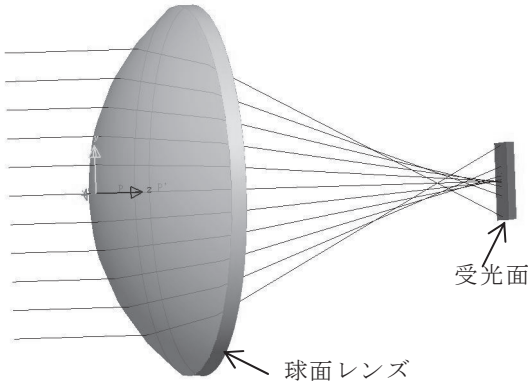


Fig. 17 球面レンズを用いた集光光学系

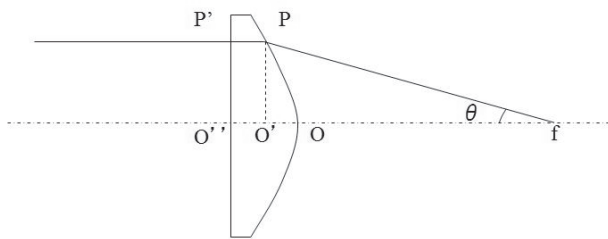


Fig. 18 光路長が同様な光学系の概念

球面収差を除去するもっとも簡単な方法は、入射側を平面として各光路長が同じになるように出射面を構成すれば球面収差は除去できる。光路長が同じということは Fig. 18 の図において、光軸を通る $O'' \rightarrow O' \rightarrow O \rightarrow F$ の光路と任意の光線高を通る $P' \rightarrow P \rightarrow F$ の光路が等しくなるようにすればよい、このレンズの屈折率を N 、レンズがおかれている媒質の屈折率を 1 とすると、 $N \cdot \overline{P'P} + \overline{PF} = N \cdot \overline{O''O'} + N \cdot \overline{O'O} + \overline{OF}$ となる。ここで、 $N \cdot \overline{P'P} = N \cdot \overline{O''O'}$ から $\overline{PF} = N \cdot \overline{O'O} + \overline{OF}$ となる。 $\overline{PF} = t$ 、 $\overline{OF} = f$ と置くと $t = f + N \cdot (t \cos \theta - f)$ となり、 $t(N \cos \theta - 1) = (N - 1)f$ と表わせる。ここで光線の出射点 P の座標を (x, y) とすると $t = \sqrt{x^2 + y^2} \cos \theta = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ となる。上式に

代入して整理すると $(x - \frac{N}{1+N}f)^2 + \frac{y^2}{1-N^2} = (\frac{f}{1+N})^2$ となり一般的な円錐曲線の式 $x^2 + \frac{y^2}{1+K} = r^2$ と対比すると、コーニック係数を $k = -N^2$ 、曲率半径を $r = \frac{f}{1+N}$ 、中心を $\frac{N}{1+N}f$ とした円錐曲線となる。一般的に $N > 1$ であるため $k < -1$ となりこの曲面は双曲面となる。

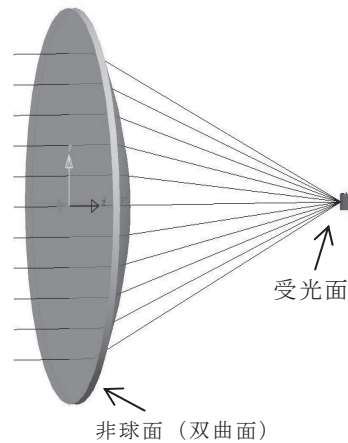


Fig. 19 双曲面を出射面とした太陽光集光用光学系

先の単レンズと同様に双曲面を用いて口径 240 mm、焦点距離 230 mm で設計を行った場合の光学系を Fig. 19 に示す。外向性のコマ収差、色収差は大きい球面収差は良好に補正されている。

この考え方をフレネルレンズの各輪帯に適用することでどのような考えかたのフレネルレンズの設計も行うことができる。口径 240 mm、焦点距離 230 mm で焦点位置に対辺 10 mm 長さ 25 mm のホモジナイズ用のロッドレンズを使用した場合の光学系を Fig. 20 に、シミュレーション結果を Fig. 21 に示す。シミュレーション結果を確認するとフレネルレンズに入射するエネルギー密度は $1.0 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2$ で受光面を $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ としており受光面でのエネルギー密度は 0.37 W/mm^2 であり集光倍率は約 370 倍となる。また、ロッドレンズを使用することで太陽電池受光面のむらも解消されていることが確認できる。

実際に太陽光発電に使用されているレンズには、入射面を凸の球面とすることでコマ収差を補正したフレネルレンズを使用した製品も実用化されている²³⁾。

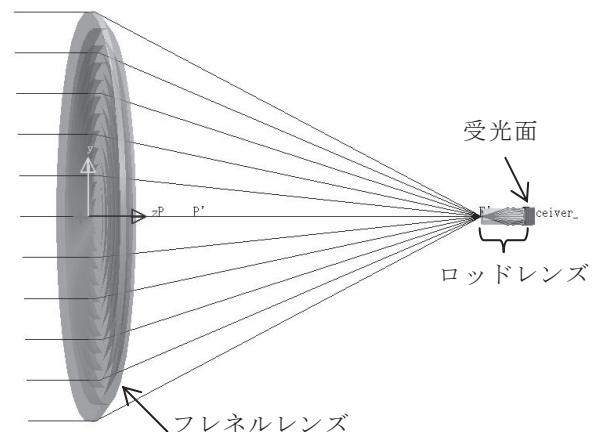


Fig. 20 双曲出射面フレネルレンズ太陽光集光光学系

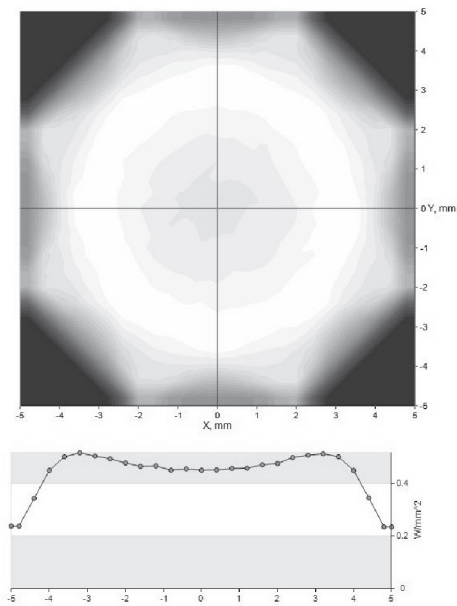


Fig. 21 フレネルレンズ太陽光集光光学系での受光面強度分布

太陽光発電で用いられている光学系としては上記で述べたようなレンズ型のほかに反射型の集光型太陽電池も実用化されている。(Fig. 14 参照)

考え方は主鏡と副鏡を用いた Fig. 22 のような反射光学系で、レンズと同様に口径 240 mm 焦点距離 230 mm で主鏡を放物面、副鏡を双曲面とし設計した結果を示す。また、今回のカセグレン光学系は反射のみを用いた光学系であるため、色収差は発生せず非常に良い結像特性を持っているが副鏡が有効口径にたいして影となってしまうために若干ロスが生じる。

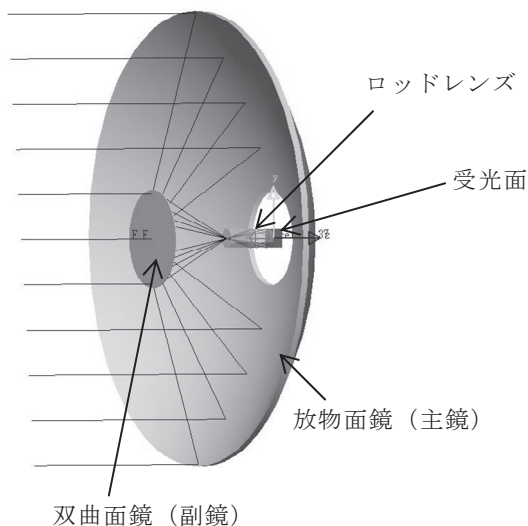


Fig. 22 カセグレン集光光学系

カセグレン光学系も、フレネルレンズ光学系と同様にモデルを作成しシミュレーションを行った。シミュレーション結果を Fig. 23 に示す。結果を確認すると主鏡に入射するエネルギー密度を $1.0 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2$ とし、受光面を $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ にすると受光面でのエネルギー密度は 0.42 W/mm^2 となり集光倍率は約 420 倍となる。

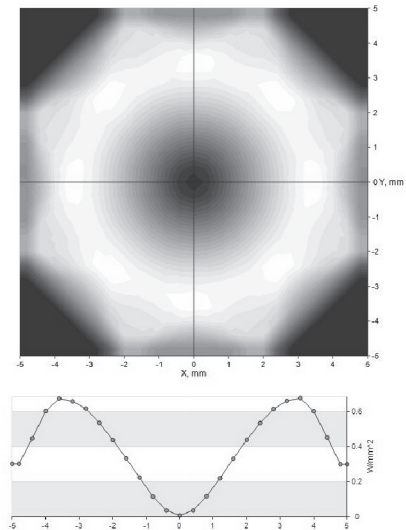


Fig. 23 カセグレン集光光学系での受光面強度分布

6. まとめ

太陽光を有効に利用する方法として、太陽炉、太陽光発電及びそれらの効率を高める光学デバイスについて述べてきた。太陽光の利用において効率よく太陽光を集光し熱エネルギーや、電気エネルギーを得ようとする、光学設計の技術と太陽発電においては太陽電池セルの技術開発が重要である。

また、太陽光を効率よく集光するためには、太陽炉においてはヘリオスタット、太陽電池では追尾システムなどで、光学系を含む太陽光集光システムを太陽と正対することが必須となる。特に太陽光発電においては追尾システムの誤差が直接発電効率に影響してくる。追尾システムではメンテナンスや修理が必要になり、追尾システムのコストが高いだけでなく設置後においても費用がかかることがデメリットとして挙げられる。しかし追尾無しでは太陽光を効率よく集光することが困難である。

現在は、セルの効率や光学デバイスの集光効率が多く研究されているが、今後においては安価で信頼性の高い追尾システムや基本的に追尾しなくても集光できる光学デバイスの研究が進んでいくと考えられる。現在、我々も新興国でも使用可能な、追尾をせずにファイバーに効率よく太陽光を入射できる光学系の開発を行っており、近い将来紹介することができると考えています。

本解説では、主に太陽光エネルギーの熱及び電気エネルギーへの変換の現状について述べたが、最近注目されている変換として、レーザー励起への応用がある。特殊な共振器を用いることで効率よく太陽光をレーザー励起に用いる研究が進んでいる²⁴⁾。

謝辞

本解説を纏めるに際して、各種の調査、シミュレーションにおいて協力をしていただいた、学部生の向原悠香氏並びに丸茂電機工業の馬場洵子氏に深謝致します。

参考文献

- 1) 佐藤勝昭：「太陽電池」のキホン(第1版)ソフトバンククリエイティブ, (2011) pp. 14-16.
- 2) 朝日新聞デジタル：ロンドン五輪聖火リレーで始まるオリンピックで採火, (2012.05.10), <http://www.asahi.com/sports/update/0510/TKY201205100530.html>. 2012.05.10.
- 3) 鶴田匡夫：第5・光の鉛筆，光技術者のための応用光学，(株) 新技術コミュニケーションズ, (2004) pp. 523-525.
- 4) 鶴田匡夫：第5・光の鉛筆，光技術者のための応用光学，(株) 新技術コミュニケーションズ, (2004) pp. 525-52.
- 5) 若狭湾エネルギー研究センター：
<http://www.werc.or.jp>.
- 6) 野口哲夫：高温太陽炉とその利用，精密機械，44巻1号, (1975) pp. 29-38.
- 7) プロメス：<http://www.promes.cnrs.fr/>.
- 8) 日本経済新聞：太陽熱発電の商業運転，欧米で続々始まる, (2010.11.22), http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK17030_X11C10A1000000/.
- 9) 桜井武麿：太陽炉の製作と成果，日本物理学会誌，20巻1号 (1965) pp. 18-30.
- 10) Joseph Kalowekamo, Erin Baker: Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells, Solar Energy 83 (2009) pp. 1224-1231.
- 11) M. A. Green et al.: Solar cell efficiency tables (version 35): Progress in Photovoltaic Research Application, Vol. 18 (2010) pp. 144-150.
- 12) 山口真史：超高効率太陽電池，電子情報通信学会 Vol. 93, No.3 (2010) p. 212.
- 13) EE Times Japan, (2010.10.17), <http://eetimes.jp/ee/articles/1010/17/news002.html>, 2010.10.17.
- 14) 山口真史：超高効率太陽電池，電子情報通信学会 Vol. 93, No.3 (2010) p. 213.
- 15) 高本達也他：化合物フレキシブル太陽電池の開発，シャープ技報、第90号 (2004) pp. 61-64.
- 16) 柴田善朗：次世代太陽電池への期待-色素増感型太陽電池, (2012). IEEJ (日本エネルギー経済研究所)、
http://eneken.ieej.or.jp/clean_energy/renewable_top.html
- 17) 佐藤勝昭：「太陽電池」のキホン(第1版)ソフトバンククリエイティブ, (2011) pp. 88-156.
- 18) 大同特殊鋼：<http://www.daido.co.jp/products/cpv/index.html>.
- 19) 西村啓道：集光型太陽電池 (CPV) 用ガラス部品とその役割，THE CHEMICAL TIMES, No.2 通巻 220号 (2011) pp. 7-11.
- 20) 山梨県北杜市：<http://www.city.hokuto.yamanashi.jp/>
- 21) SolFocus：<http://www.solfocus.com/en/index.php>.
- 22) DLR(German Aerospace Center): <http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10002/>.
- 23) 荒木健次他：変換効率 28%の集光式太陽光発電装置開発，電気製鋼，第75巻3号(2004) pp.165-172.
- 24) M. Endo: Feasibility study of a conical-toroidal mirror resonator for solar-pumped thin-disk lasers, OPTICS EXPRESS Vol. 15 (2007) pp. 5482-5493.

著者紹介



浅川久志

丸茂電機株式会社

1963年生まれ。1985年日本大学生産工学部機械工学科卒業。同年、丸茂電機株式会社入社。現在開発部照明器具課。

日本照明学会会員

照明器具に使用する結像系、非結像系の光学設計に従事。

主な研究分野は、LEDなどの新光源を用いた照明応用に関する研究。

趣味：オートバイでの林道ツーリング、キャンプ、釣り、ウォーキング。

著者紹介



若木守明

東海大学工学部光・画像工学科教授

1948年生まれ。1975年東京教育大学（現筑波大学）理学研究科物理学専攻修了。博士（理学）

日本物理学会，応用物理学会，日本光学会，日本レーザー学会，OSA，SPIE 各会員

主な研究分野は、光と物質の相互作用の研究を基にして物質中での現象の解明を目的とした光物性（より一般的には、材料科学）、レーザーの基礎と応用を中心とした光エレクトロニクス、レーザー光と生体との相互作用を幅広く研究するレーザー医学、宇宙の神秘を解き明かす赤外線天文学の分野を中心に展開している。

著書：光学のすすめ（オプトロニクス、1997）、光工学入門—光の基礎知識のすべて（実教出版、1998）、光エレクトロニクス辞典（オプトロニクス社、2004）、波動光学入門（実教出版、2004）、Physical Properties and Data of Optical Materials (CRC Press, 2007)、量子光学の基礎（東海大学出版、2009）、Optical Materials and Applications (CRC Press, 2012) その他

趣味：自然探索（風景写真撮影中心）、ジョギング、テニス、オーディオ