

太陽エネルギー取得追尾系のエクセルギー論

Exergy Analysis of Solar Energy System with Tracking Device

鈴木研夫*
Akio SUZUKI**Abstract**

The exergy concept was used to estimate solar energy systems with tracking devices through a simple model. The solar energy system can be roughly divided into two types, photon-conversion and heat-collection systems. These conversion processes of solar energy to work are fundamentally different: the former efficiency depends on the spectral distribution of solar radiation and the latter on the direct insolation intensity. In order to compare their effectivenesses the two systems with tracking devices were discussed individually.

The photon-conversion system (PCS) can gain work directly as a form of electric energy with simple conversion process from both direct and diffused radiations. Its efficiency is low due to the fundamental mechanism of conversion process, however, these characteristics of PCS leads to an important result: i.e., PCS without a concentration device can gain solar energy effectively. Whether or not PCS needs to track the sun depends largely on the stability of the direct radiation component at the location of PCS.

Although the heat-collection system (HCS) gets more exergy gain than PCS, the system has some disadvantages compared with PCS. Firstly, HCS requires only the direct component of solar radiation. Secondly, the complexity of HCS conversion process, which gains solar energy as a form of heat, causes the system to become larger and more complex than PCS.

1. 序

太陽エネルギーを何らかの目的で取得する際に、その目的に応じた集光装置を必要とする場合がある。この場合、取得エネルギー量だけでなく質、即ちエクセルギーの大きい状態でそのエネルギーが必要であることが一般的な理由である。例えば太陽エネルギーを熱として取得して発電を目的とする場合に通常の平板型集熱器を使うのであれば、高効率集熱は行なえたとしても、集熱温度が低すぎるためにタービンを回して発電を行なうことに対して非常に難かしい技術が要求されることになる。それゆえ実際に発電を目的とする場合には、集光系を用いることによってエネルギーの質を平板型集熱器から取得し得るよりもはるかに高くして集熱を行なっているのである。言い換えれば、高エクセルギー集熱を行なうために集光系を必要としている訳である。

しかし、集光系を採用する場合の一般的な必要条件として追尾しなければならないというごく当たり前の問題がある。追尾を行なうということは、太陽エネルギーを取得する目的に対して仕事を行なうということを

意味している。もし単独のシステムを考えるならば、常に正味の取得エネルギーが正でなければならず、単独でない場合においても追尾に要する外部からの供給エネルギーよりも多くのエネルギーがそのシステムで取得できなければ意味がない。更に最終的に消費系に送られるエネルギーは、ある設定量以上でないとその目的はやはり意味の無いものとなるであろう。

追尾を行なってまでも集光するということは、あくまでも高エクセルギーでのエネルギー取得が目的である。本論文では、簡単化したエクセルギー取得モデルを通して追尾に対する物理的な評価およびシステムについての考察を行なったものである。

尚、論文中の各記号の説明は、最後にまとめて表にしておく。

2. モデルシステム

図1に議論の対象とする太陽エクセルギー取得追尾システムモデルを示す。以下の議論において、各エク

*上智大学物理学科 (株)国城金型工業より出向中
Dept. of Physics, Sophia University On loan from
Kokujo Kanagata Ind. Co., Ltd.

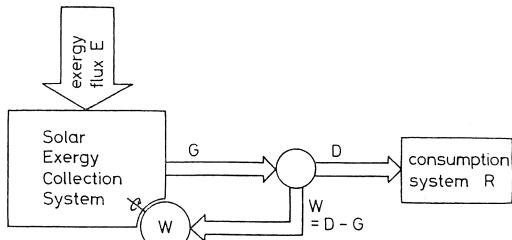


図 1 追尾装置を持つ太陽エクセルギー取得系モデルとエクセルギーの流れ、大文字のアルファベットは各々エクセルギー量を表わす。

セルギーおよびエネルギー流は全て単位受光面積当たりの量、即ちそれらの単位としては W/m^2 であるものとする。太陽エクセルギー受光系（以下、SECS）は太陽からエクセルギー流 E を得て、エクセルギー流 G を出力している。更に追尾動力 W^* は、 G に対して割合 λ だけがフィードバックされることで得られている。それゆえに、この追尾系を含んだシステムの正味取得エクセルギー流 D は、

$$D = G - W = (1 - \lambda)G \quad (1)$$

で与えられる。このモデルでは、全てエクセルギー流で表わしているので、太陽光から直接電気エネルギーを得る太陽電池系にもそのまま適用することができる。即ち、取得エクセルギー流 G 自体のエネルギー形態の制約は全く無い**。

エクセルギーとエネルギーの間の換算には、エクセルギー有効比 γ を用いれば良い。上記に出てきたエクセルギー流と、対応するエネルギー流との関係を下記に示す。

$$\begin{aligned} E &= \gamma_i \hat{E} & \gamma_i: \text{日射のエクセルギー有効比} \\ G &= \gamma_g \hat{G} & \text{電気エネルギーの時は } \gamma_g = 1 \\ W &= \gamma_w \hat{W} = \hat{W} & \gamma_w = 1 \quad (\hat{W} \text{は力学的エネルギー}) \\ D &= \gamma_d \hat{D} & \text{電気エネルギーの時は } \gamma_d = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

尚、エネルギー量であることは \wedge で表わした。また、各 γ はそれぞれのエネルギー形態に対応したエクセルギー有効比である。

更に、このシステムから期待される消費系に必要な単位受光面積当たりのエクセルギー流を R とすれば、運転条件として、

$$D \geq R \quad (3)$$

が与えられる。このシステムが運転される時には、必ずこの式が満足されていなければならないものとする。式(3)を式(1)に代入して整理すれば、得得エクセルギー流 G に対する追尾動力 W の割合入の満足すべき不等式として、

$$\lambda \leq \frac{W/R}{1 + W/R} \quad (4)$$

または、式(1)を用いれば、

$$\lambda \leq 1 - \frac{R}{G} \quad (4')$$

を得る。

次に SECS のエクセルギー効率 ε を、

$$\varepsilon = \frac{G}{E} \quad (5)$$

で定義する。この時、このシステムのエネルギー効率 η は、

$$\eta = \frac{\hat{G}}{\hat{E}} = \frac{\gamma_i \varepsilon}{\gamma_g} \quad (6)$$

で表わされる。式(3)の運転条件より、式(5)、(6)で表わされる各効率は運転に必要な下限値を持つことになる。式(1)、(3)を式(5)に適用すれば、SECS のエクセルギー効率 ε が満足すべき範囲として、

$$\varepsilon \geq \frac{R + W}{E} \quad (7)$$

が得られる。同様に上式から、エネルギー効率 η の満足すべき範囲として

$$\eta \geq \frac{\gamma_i}{\gamma_g} \frac{R + W}{E} \quad \text{又は} \quad \eta \geq \frac{1}{\gamma_g} \frac{R + W}{\hat{E}} \quad (8)$$

を得る。集熱系では、 η の満足する範囲として上限値も存在するが、このことについては後述する。

このシステムモデルに関する仮定は以上である。このシステムは蓄エネルギーに関する装置は全く持っていない。それゆえこのモデルシステムは瞬時のエネルギー取得を前提としている。もし蓄エネルギー装置も考慮するのであれば、そのデバイスへの必要供給量として新たに R 値を設定して解析を行なえば良い。しかし一般には、蓄エネルギー装置は消費系に対するエネルギー供給の時間的安定性を目的とするものであり、その意味で理想的な蓄エネルギー装置をこのモデルシステムの外に付随させるのであれば今回の議論においては何ら変更するものは無い。

3. 光量子変換系への適用

太陽電池などの光量子変換を利用するものは、その変換効率が日射強度では無く、太陽光のスペクトル分

* ここに言う追尾動力とは追尾に必要な全てのエネルギーを含む。即ち、もし追尾制御のために計算機を用いているのであれば、その計算機の消費電力も含まれる。しかし一般には制御に必要な動力は非常に小さく、規模の充分大きな系であれば無視し得ると考えられる。

** エネルギー形態の区別はエクセルギー有効比（エネルギー量とエクセルギー量の間の変換因子）のみによって成される。このことは全てのエクセルギー量でも同じである。

布に依存する*. 例えば半導体太陽電池では、そのバンドギャップの大きさによって有効なスペクトル領域が決定される。この章では、日射スペクトル分布に対してSECSのエネルギー効率が一定 ($\eta=\text{const.}$) であり、かつ取得エネルギー \hat{G} の形態が電気エネルギー ($\gamma_g=1$) で与えられる場合について議論を行なう。

固定されたエネルギー効率の値を η_0 と置けば、式(6)よりその時のエクセルギー効率 ε_0 は、

$$\varepsilon_0 = \frac{\gamma_g \eta_0}{\gamma_i} = \frac{\eta_0}{\gamma_i} \quad (\because \gamma_g=1) \quad \dots\dots\dots(9)$$

で与えられる。ここで、日射のエクセルギー有効比 γ_i は、太陽の放射輝度温度を θ_s 、地上での環境温度を θ_a として

$$\gamma_i = 1 - \frac{\theta_a}{\theta_s} \quad \dots\dots\dots(10)$$

で表わされる¹⁾。ここで $\theta_s=\text{const.}$ と考えるならば、式(9)のエクセルギー効率 ε_0 も一定値として扱うことができる。この時、利用できる日射エクセルギー流の範囲は式(7)より、

$$E \geq \frac{R+W}{\varepsilon_0} \quad \dots\dots\dots(11)$$

で表わされる。更に、日射エネルギー流の範囲を式(2)を用いて表わせば、

$$\hat{E} \geq \frac{R+W}{\eta_0} \quad \text{又は} \quad \hat{E} \geq \frac{R+W}{\gamma_i \varepsilon_0} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。利用可能日射量の下限値は等号が成立する時に与えられる。

例として、 $\eta_0=0.1$ の太陽電池を考えてみる。 $\theta_a=300K$ 、 $\theta_s=5800K$ を仮定すれば、 $\gamma_i=0.95$ となり、式(9)よりエクセルギー効率は $\varepsilon_0=0.11$ で与えられる。ここで、 $\eta_0 \leq \varepsilon_0$ となる事に注意すべきである。これは $\gamma_g=1$ かつ $\gamma_i \leq 1$ あることに起因し、熱エネルギーとして得る場合には $\gamma_g \leq \gamma_i^{**}$ があるので、 $\eta_0 \geq \varepsilon_0$ となる。この性質は熱を介さない太陽エネルギーを仕事（電気エネルギーを含む）に変換する場合の特徴である。

この太陽電池系における追尾について考えてみる。ここでは瞬時のエクセルギー取得ではなく一日単位における評価を行なう。議論の簡単化のために、太陽の動きはある水平面を中心に置いた半天球の水平面の法線上を通る大円を移動するものと仮定する。更に、天球は等輝度拡散面であるとし、直達日射エクセルギー流は太陽方向の垂直面に対して一日を通じて一定の強度を持つと想定する。本来ならば、直達光と散乱光ではエクセルギー有効比も異なるが、ここでは両者は等しいものと仮定する。

追尾を行なう系の一日の正味取得エクセルギーを

G_{day^t} で表わせば、

$$G_{day^t} = \int_{day} (\varepsilon_0 E(t) - W) dt \quad (\text{J/m}^2 \cdot \text{day}) \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。ここで、 $E(t)$ は一日を通じて一定と仮定した法線面直達日射エクセルギー流 E_d と天球面積に比例した散乱日射エクセルギー流との和であり、水平面に対する散乱日射エクセルギー流を E_s とすれば、

$$E(t) = E_d + \left(\frac{1}{2} + \frac{\omega t}{\pi} \right) E_s$$

で表わされる。ここで ω は太陽の角速度であり、その単位は (rad/hr) である。また t は日出時をゼロにした時刻 (hr) である。同様にして水平面に固定された系の一日の取得エクセルギー G_{day^f} は、

$$G_{day^f} = \int_{day} \varepsilon_0 (E_d \cos \varphi + E_s) dt \quad (\text{J/m}^2 \cdot \text{day}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

で表わされる。ここで φ は直達光の水平面への入射角であり、時刻 t を使って $\varphi = \frac{\pi}{2} - \omega t$ と表わされる。

固定系よりも追尾系が有効であるためには $G_{day^f} < G_{day^t}$ でなければならない。式(13)、(14)の積分を日照時間に対して実行して比較すれば、追尾系の必要動力 W の満たすべき範囲として、

$$W < \varepsilon_0 \left[\left(1 - \frac{2}{\pi} \right) E_d - \frac{1}{4} E_s \right] \quad \dots\dots\dots(15)$$

を得る。ここで再度注意すべきことは、 E_d も E_s も一日を通じて一定であると仮定していることである。

先の水平面に対して太陽を真正面に置いた時の直達成分割合を r とすれば、式(15)は、

$$W < \left[\left(\frac{5}{4} - \frac{2}{\pi} \right) r - \frac{1}{4} \right] \varepsilon_0 E \quad \dots\dots\dots(15')$$

という形で与えられる。ここで E は水平面で太陽が真正面にある時の全日射エクセルギー流である。 $r=0$ の時は完全な曇天日を表わし、直達成分はゼロの場合である。 r の値が 1 に近づくに従って直達成分は大きくなる。ひとつの計算例として、 $E=800 \text{ W/m}^2$ 、 $r=0.6$ の場合を考える。式(15')より W 値の範囲として $W < 10.4 \text{ (W/m}^2)$ という値を得る。この数字は規模の大きな太陽電池系にとっては厳しい値ではないと考えられるが、 W 値が小さければ小さい程稼動可能な最小の E 値も低くなるので、この数値より充分余裕を持った小さな値である事が好ましい。

$r=0$ (曇天日) の場合は必然的に追尾系も固定して使用することになる。固定使用か否かの判断は r 値の大きさによって決められる。式(15')の右辺がゼロと

* この他に、実際には温度も大きく関係してくる（例えば参考文献4）。しかしここでは簡単のため、変換効率の温度依存性は無視し、常に一定であるものと仮定する。

** 热力学的に集熱板温度は太陽日射の放射輝度温度 θ_s を越えることはできない。

なるのは、

$$r = \frac{1}{4(5/4 - 2\pi)} \approx 0.41$$

の時であり、 E 値の大きさには依存しない。即ち、いくら E 値が大きくとも、その直達成分割合 r が 0.41 以下となるのであれば追尾操作は行なわない方が良いことがわかる。この r 値は有限の W 値に対してはより厳しい値を持つことになる。

もし集光系を用いて直達光のみを対象に追尾系が設計されるのであれば式 (15) の条件はより厳しいものとなる。今、集光系の使用によってセル温度が上昇してもその変換効率が変化しないものと仮定して式 (13) および (14) の積分を実行して比較すれば、式 (15') と同様に、

$$W < \left[2 \left(1 - \frac{1}{\pi} \right) r - 1 \right] \varepsilon_0 E \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

を得る。先と同様にして右辺がゼロとなる条件を求めるとき、 $r \approx 0.73$ を得る。この値は比較的曇天日の多い日本にとってはかなり厳しい値であり、集光系使用の太陽電池追尾系は有効なエクセルギー取得方法ではないことが窺える。更に追尾誤差や集光誤差、光学系の光学的損失を考慮すると W 値の制約はより厳しくなる事も注意すべきである。

以上の例でもわかる通り、追尾動力 W は極力小さくする事が必要である。この最大の理由としては、光量子変換系の変換効率が小さいという事が挙げられる。太陽の動きで、その角速度が 15deg/hr であることから、追尾系に必要な角速度はおよそ 7×10^{-5} rad/s である。例えば半径 1 m、質量 100kg の球がこの角速度で回転している時の回転エネルギーは 10^{-7} J でしかない。即ち、純粹に力学的には、回転中心と質量中心が一致していれば非常にわずかなエネルギーしかその追尾系には必要が無いことがわかる。もちろん現実的には、追尾制御系も含めてこのような値とは比べものにならない程のエネルギーを必要とする。追尾系で最も厄介なのが強風の対処である。このため通常の追尾系では、光学系の支持と共に風に対する充分な強度を保たなくてはならないので非常に堅牢なものが設計されている。このことは追尾エネルギーを増大させている一つの大きな原因である。追尾エネルギーの必要量は、システム設計の時点での充分考慮すべき問題である。上記のこととに加え、太陽電池などの光量子変換系は散乱日射に対しても有効に働くことを考えれば、光量子変換系に対して集光系を用いた追尾を行なうのはあまり適した使い方では無いことが窺える。

光量子変換系で追尾方式を採用するか否かの問題に

対して大きく影響する別のファクターとして、天候の安定性が挙げられる。これは地域差の大きい問題ではあるが、先に述べたように、晴天時は追尾を行ない、曇天時は固定して利用できる可能性がある。これはあくまでもその地域の晴天時における太陽エクセルギー流 E_n に対して、充分追尾動力の W 値が小さい場合である（式 (15) 参照）。

ここでの議論では、光量子変換系のエクセルギー変換効率はスペクトル分布のみに依存し、その強度による効率変化は無いものとしたが、実際にはいくらかの強度依存性などが存在する。またエアマスによっても太陽光のスペクトル分布は変化するので効率も当然変化するが、このことも考慮に入れていない。しかしこれらの変化は、熱エネルギーの温度変化による変換効率の変化ほど顕著なものではないため、実際に集光系を使うことを考えない限りここで得られた結果の大筋にはほとんど影響されて来ない。

太陽電池系も含む光量子変換系の理論的な変換効率の上限値は、その系からの放射など全ての損失が無ければ熱力学的な議論よりカルノーの表式 $1 - \theta_a / \theta_c$ で与えられる⁸⁾。ここで θ_a は吸収体温度 (absorber temp.) と呼ばれ、ある放射を受けている吸収体中の励起体（例えば、太陽電池内の励起電子や光合成におけるクロロフィル分子）の数を暗所で維持するための吸収体の相当温度を表わしている。この θ_c は吸収体の持つバンドギャップエネルギーに大きく依存している。もちろん実際には、励起状態からのボルツマン統計に従う損失などが存在するため、その変換効率がカルノー表式に到達することはできない。しかし適當なバンドギャップエネルギーを選ぶことにより、理論的にはかなり高効率化（エネルギー効率～29%⁹⁾、エクセルギー効率換算～31%）が期待できる。この変換系において最も重要なことは、その変換過程にマクロ的な熱の段階が介在していないことである。太陽電池においてはその出力が電気エネルギーであり、そのエクセルギー有効比が 1 であることに大きな価値がある。また光化学反応系では、生成系をそのまま蓄えることができるという蓄エネルギーの立場からの有利さがある。これらの意味で、光量子変換系はエクセルギー的に非常に有効な太陽エネルギー変換系となる可能性があり、理論的な議論^{4~10)}から更に発展した太陽電池に限らない実際的な研究が今後期待される。

4. 集熱系への適用

光量子変換系では、太陽光のスペクトル分布に影響

されるため、日射強度にあまり依存しない一定したエクセルギー効率を持つことになる。しかし集熱系では、太陽スペクトルの広い領域を対象としているため、集熱温度を高めることにより光量子変換系よりも高いエクセルギー効率で運転できる可能性を持っている。この章では一般的な集光集熱系と同様に、直達日射のみを対象として考える。

全日射エクセルギー流の直達成分を E_d で表わせば、SECS の直達エクセルギー効率 ε_d および直達エネルギー効率 η_d は各々、

$$\varepsilon_d = \frac{G}{E_d} = \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

および

$$\eta_d = \frac{\hat{G}}{\hat{E}_d} = \frac{\eta}{\alpha} = \frac{\gamma_i}{\gamma_g} \varepsilon_d \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

で表わされる。ここで、 α は法線面全日射量の直達成分割合である。更に式(7)より、 ε_d の満足すべき範囲は、

$$\varepsilon_d \geq \frac{R+W^*}{E_d} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

で与えられる。

議論を展開する上で 1 つの集熱系のモデルを考える。このモデルは通常の平板型集熱器と同様に、線形の熱損失過程を持つものとすれば、

$$\hat{G} = \kappa \hat{E}_d - AU(\theta_p - \theta_a) \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

として単位受光面積当たりの集熱量を表わすことができる。ここで、 κ は光学的効率、 A は集熱部と受光部との面積比、 U は集熱部単位面積当たりの熱損失係数 ($\text{W}/\text{deg}\cdot\text{m}^2$) および θ_p と θ_a は各々集熱部平均温度および等価外気温である。尚、 κ は実際上エネルギーに対するものとエクセルギーに対するもので若干の違いがあるが、以後の展開において両者は等しいものとする。次に集熱部の上限温度 θ は、式(19) で $\hat{G}=0$ と置くことにより、

$$\theta = \frac{\kappa \hat{E}_d}{AU} + \theta_a \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

として得ることができる。

更に、集熱量 \hat{G} に対するエクセルギー有効比 γ_g を議論の単純化のためにカルノー効率で表わされるものとすれば、

$$\gamma_g = 1 - \frac{\theta_a}{\theta_p} \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

となる。実際には、熱媒体は有限の熱量を持っていることから、式(21) はカルノー効率の温度積分で表わされる方がより現実的ではあるが、その場合には超越関数が表われ、議論が複雑化するのを避けるためにこの式を仮定した。このことは、系の物理的な動向を見る上であまり問題とはならない。また、温度として集

熱媒体温度ではなく、集熱部温度を採用しているのも同じ理由による。

式(19) を用いて直達エネルギー効率 η_d を表わせば、

$$\eta_d = \frac{\hat{G}}{\hat{E}_d} = \kappa - AU \frac{\theta_p - \theta_a}{\hat{E}_d} \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

となる。更に、直達エクセルギー効率 ε_d と η_d の関係は、式(22) を θ_p について解き、式(21) に代入して式(17) を用いれば、

$$\varepsilon_d = \frac{\eta_d}{\gamma_i} \frac{\kappa - \eta_d}{(\kappa + AU \theta_a / \hat{E}_d) - \eta_d} \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

または、

$$\eta_d = \frac{1}{2} \left\{ (\kappa + \gamma_i \varepsilon_d) \pm \sqrt{(\kappa - \gamma_i \varepsilon_d)^2 - 4 \gamma_i \varepsilon_d \frac{AU \theta_a}{\hat{E}_d}} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (23')$$

として表わされる。式(23')において、ある ε_d の値に対応する η_d の解を η_d^+ , η_d^- ($\eta_d^+ > \eta_d^-$) とする。

式(18) が成立するためには、 η_d の領域として、

$$\eta_d^- \leq \eta_d \leq \eta_d^+ \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

でなければならない。このことは、通常のエネルギー効率が単調減少関数となるのに対して対応するエクセルギー効率曲線は上に凸の関数となっていることからも明らかである²⁾。

更に式(23')の平方根記号内がゼロ以上でなければならぬことから、 $\varepsilon_d \leq \kappa \gamma_g / \gamma_i$ を考慮して整理すれば、式(20) の θ を用いて

$$\varepsilon_d \leq \frac{AU}{\hat{E}_d} \frac{(\sqrt{\theta} - \sqrt{\theta_a})^2}{\gamma_i} \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

を得る。この式の右辺は、式(22) と(23) を用いて極値条件 $d\varepsilon_d/d\theta_p=0$ を解くことによっても得ることができ。式(18) および式(25) より、結局、直達エクセルギー効率 ε_d の取り得る範囲として、

$$\frac{R+W}{E_d} \leq \varepsilon_d \leq \frac{AU}{\hat{E}_d} (\sqrt{\theta} - \sqrt{\theta_a})^2 \quad \dots \dots \dots \quad (26)$$

を得る。この式を使って式(23') および式(24) に戻って考えれば、 η_d の取り得る範囲として、

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left[(\kappa + \gamma_i \varepsilon_d^{min}) - \left\{ \kappa^2 - 2\kappa \frac{\theta + \theta_a}{\theta - \theta_a} (\gamma_i \varepsilon_d^{min}) \right. \right. \\ \left. \left. + (\gamma_i \varepsilon_d^{min})^2 \right\}^{1/2} \right] \leq \eta_d \leq \frac{1}{2} \left[(\kappa + \gamma_i \varepsilon_d^{min}) \right. \\ \left. + \left\{ \kappa^2 - 2\kappa \frac{\theta + \theta_a}{\theta - \theta_a} (\gamma_i \varepsilon_d^{min}) + (\gamma_i \varepsilon_d^{min})^2 \right\}^{1/2} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

* 集熱系の場合は、追尾運動の他に熱媒体を輸送するためのエクセルギー T が必要な場合が多い。この時式(18) は正確には $\varepsilon_d \geq (R+W+T)/E_d$ で表わされなければならない。しかし T は常に W との和で評価されるので、ここでは W の値の中にも T 含まれるものとする。但し、 T 値は特に大きなシステムでは圧力を常に供給しなければならないので、通常は $W < T$ であると考えられる。

を得ることができる。ここで、 ε_d^{\min} は式 (26) または式 (18) で与えられる ε_d の取り得る最小値である。また、この系のエネルギー効率の最適値 η_d^0 は式 (25) で与えられる最大エクセルギー効率 ε_d^{\max} の時に与えられ、

$$\eta_d^0 = \frac{AU}{\hat{E}_d} \sqrt{\theta} (\sqrt{\theta} - \sqrt{\theta_a}) \quad \dots\dots\dots(28)$$

となる。

この系の稼動可能な下限直達日射量 \hat{E}_d^{low} は、 $\varepsilon_d^{\max} = \varepsilon_d^{\min}$ の条件より求めることができ、式 (26) より、

$$\hat{E}_d^{\text{low}} = \frac{1}{\kappa} [2\{AU\theta_a(R+W)\}^{1/2} + (R+W)] \quad \dots\dots\dots(29)$$

で与えられる。この時、 $\eta_d^{\max} = \eta_d^{\min}$ (式 (27) の最大値と最小値) も成立している。更にこの系で稼動可能な $(R+W)$ の上限値 $(R+W)^{\text{up}}$ は式 (18) の等号が成り立つ時の式 (26) の最大値より求めることができ、

$$(R+W)^{\text{up}} = AU(\sqrt{\theta} - \sqrt{\theta_a})^2 \quad \dots\dots\dots(30)$$

となる。この式に式 (20) を代入して整理すれば式 (29) と同じ表式を得ることができる。

次により実際的に考察する上で、ある集熱系の数値モデルを考えてみる。この系の直達光に対する光学的効率 κ および等価外気温 θ_a を各々 0.8 および 300K とする。更に、この集熱系の太陽定数 ($1,367 \text{W/m}^2$) に対する上限温度を 4,000K であると仮定すれば、式 (20) より受光面積当たりの全熱損失係数 AU は、

$$AU = \frac{\kappa \hat{E}_d}{\theta - \theta_a} = 0.30 \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{deg})$$

となる。必要取得エクセルギー流の設定値 R を 70W/m^2 ^{*}、追尾に必要な動力 W を 10W/m^2 ^{**}とした時の、エクセルギー効率 ε_d およびエネルギー効率 η_d の直達日射エネルギー \hat{E}_d に対する範囲を図 2 に示す。また、必要取得エクセルギー流の設定値 R および追尾動力 W をゼロとした場合の正味出力エクセルギー流 G の限界線を図 3 に示す。図中の曲線から追尾動力 W の分だけ差し引いた残りの分が正味出力 D となる。

図 2において、点線で示した曲線は式 (28) の最適エネルギー効率 η_d^0 である。これは最大エクセルギー効率 ε_d^{\max} に対応している。直達エネルギー流が小さければ小さい程最低エクセルギー効率は高くなっている。これは式 (26) からもわかる通り E_d と逆比例の関係にある。 $(R+W)$ の値が小さくなれば、 ε_d の下限値も小さくなり、その分運転可能な範囲が大きくなる。この図はあくまでも定格出力として R 以上を設定している場合の運転領域を示したものである。単に運

転できれば良いのであれば、 $R=0$ (即ち $D \geq W$) とすることにより新しい下限値を描くことができる。尚、最適エクセルギー効率は最大エクセルギー効率に等しいことを再度注意しておく。

先の太陽電池のエクセルギー効率 $\varepsilon_d=0.11$ の場合に比べ、図 2 の場合には低い日射量の時にかなり高エクセルギー効率での運転が必要であることがわかる。日射強度が大きい場合でも光合成並みのエクセルギー効率 ($\sim 14\%$ ³⁾ 以上で運転されなければならない。これらの値から見て、この集熱モデル系の各特性パラメーターの設定値としては充分であり、特に、 γ_g の設定や光学的効率 κ の値はかなり余裕のある設定であるにもかかわらずその最低運転条件としては比較的高い

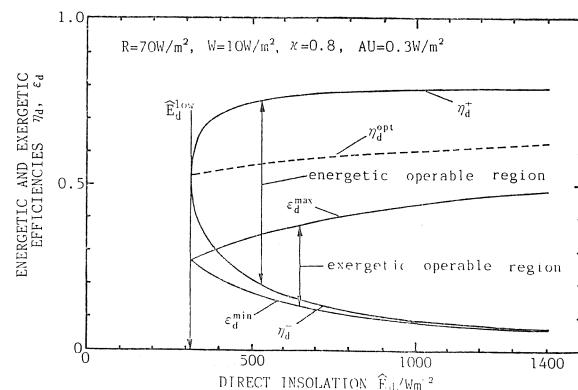


図 2 热発電モデルのエクセルギー理論による定格発電可能領域

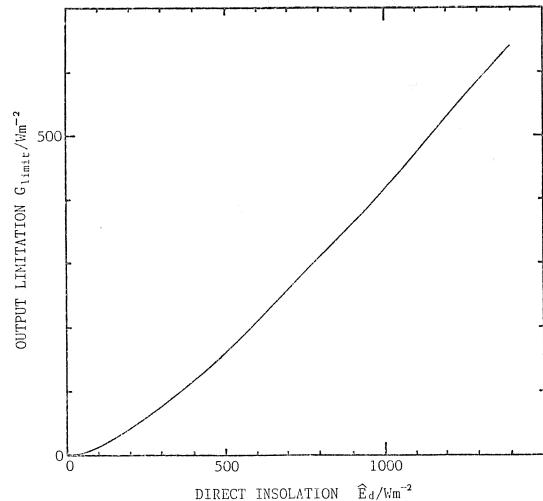


図 3 SEC S の取得エクセルギー流の上限値 ($R=0$ および $W=0$)。モデルの設定条件は図 2 の場合と同じ。

* この値は 1,000kW 出力のタワー集光系パイルットプラント(香川県仁尾町)のヘリオスタット面積 ($12,912 \text{m}^2$) から算出した参考値である¹¹⁾。

** この値は追尾動力のためだけの値としては多少大きいが、式 (18) でも説明したように、ポンプなどに必要な動力についても考慮したためである。これは光量子変換系との比較などにおける簡単化のためである。

値であると言える。更にこの議論ではエネルギー変換過程は理想エクセルギー変換を想定しているため、現実的な変換効率（例えばタービンによる熱一電気変換効率）を加味するとその運転条件はより厳しいものとなる。この意味で、熱エネルギーとして太陽エネルギーを取得し、高品質エネルギー（電気エネルギーなど）を出力するようなシステムにおける高効率運転は非常に難かしい技術を要求されることが推察される。これは何よりも、太陽エネルギーの照射密度の低さおよび変換過程における熱というエネルギー形態に依るものである。

更に集熱系にとって重要な因子となるのが直達光の絶対的な存在および高効率化のための高温度集熱の必要性である。前者の条件は、曇天日における運転が全く行なえないことを意味しており、散乱光に対しても有効に働く太陽電池系と比べても有利な条件とは言えない。後者の条件は、精密な光学系や大規模のヘリオスタット群を要求する。このことは同時に正確な追尾系を要求することになる。また集熱の場合は追尾動力自体の負荷よりもむしろ熱媒体輸送のためのポンプ動力や制御に必要なエネルギーの大きさが問題となり、先の議論でもわかる通りこの必要エネルギーを極力小さくすることがシステム設計の段階で重要である。この必要エネルギーの値は、稼動可能な下限日射量と最低エクセルギー効率に大きく影響している。以上の事および光量子変換系との比較からも集熱系から仕事を得ることの難しさを再認識すべきであると思われる。

しかし別の観点として、熱エネルギーそのものが目的である場合には、他のエネルギー供給系におけるコストとの競合で採算が合う可能性がある。またそれ以上に追尾を行なっても有益な場合の例として太陽炉がある。この場合には、温度自体が価値を持っているのであり、特に超高温用材料の耐熱試験には欠かせないものであろう。太陽エネルギーから得られるほどの高温度で広汎に実験条件を変えて物性研究ができるものは太陽炉を除いてほとんど無いと言って良いであろう。

5. 総 論

追尾を行なうという条件を前提にした太陽エクセルギー取得システムについて、エクセルギーの立場から簡単なモデルを通していくつかの議論を行なってきた。その結果、太陽電池や光化学反応に代表される光量子変換系を利用する場合には、集光装置を用いない追尾系において追尾動力が低く抑えられる限り固定使用の場合より有効となり得ることが明らかとなった。

しかし、追尾有効性は系の設置地域の晴天率にも大きく依存している。もし曇天日の多い地域であれば、追尾機構の寿命や建設コストの償却、および維持費などの問題も加味した上で追尾系を採用するか否かの判断を下さなくてはならない。固定使用の場合と追尾を行なった場合の正味取得エクセルギー量の差があまり大きくなないのであれば、構造的に単純な固定系を採用する方が寿命や維持の点から有利であるものと推察される。

集熱系においては、追尾を行なう場合と行なわない場合とで目的とする取得エネルギー温度の明確な違いがある。本論文において対象としたのは、高エクセルギー取得を目的とした集光系を持つ集熱系である。集熱系は、光量子変換系と違い太陽光スペクトルの全波長領域を対象とするために、光量子変換系よりも高いエクセルギー効率で運転できる可能性を持つ。しかし、質の高い太陽エネルギーを質の低い熱エネルギーの形態で取得し、更にその一部を高品質エネルギーである仕事の形で追尾系に還元しなければならないので、多少複雑な過程を踏むことになる。集熱系の熱損失（エクセルギー損失）の殆どはこの熱エネルギーを仕事に変換する過程で生ずるものである。この損失を減らすためにはできるだけ高い温度での集熱が必要であり、このことが正確で高倍率の集光系を要求する。この精密な集光系の必要性は、更に先とは別の面での高い技術力を必要とする。また蓄エネルギーの面から見ても現状では熱として貯えるよりも電気エネルギーから貯える方が技術的には容易である。これらの事は、光量子変換系との比較において集熱系を技術的に難かしくさせている原因である。更に現実的には、熱輸送における損失や蓄熱、熱交換器による損失、そして設置地域の晴天率などが加わり、光量子変換系よりも高エクセルギー取得が可能であるという集熱系の特質は薄れてゆく。特に日本などのように曇天日の比較的多い地域では、年間単位のエクセルギー変換効率で光量子変換系が集熱系を上回ることは充分起り得る。これらの意味で、集熱系は、光量子変換系よりも複雑な構造を要求される分だけの高い技術力と無駄の無いエネルギーフローを充分考慮したシステム設計が必要であることは明らかである。

最後に、システム的に単純な光量子変換系の種々な分野における研究と開発に今後共期待する。

謝 辞 本研究を進める上で、有意義なる助言および議論を多大に賜わりました上智大学物理学科押田勇雄教授に深く感謝致します。更に、研究の機会を御与

え下さいました（株）国城金型工業 平松保社長にも
合わせて深謝致します。

参考文献

- 1) 押田勇雄：日本太陽エネルギー学会誌，9(1983) 2.
- 2) 鈴木研夫：同誌，8(1982) 5.
- 3) 押田勇雄：“太陽エネルギー”，NHKブックス，(1983)，217—222.
- 4) M. L. Buhl, Jr., et al. : Solar Energy, 32 (1984) 75.
- 5) W. Shockley and H. J. Queisser : J. Appl. Phys., 32 (1961) 510.
- 6) J. R. Bolton : Science, 202 (1978) 705.
- 7) R. T. Ross and T-L. Hsiao : J. Appl. Phys., 48 (1977) 4783.
- 8) R. T. Ross : J. Chem. Phys., 45 (1966) 1.
- 9) R. G. Mortimer and R. M. Mazo : ibid., 35 (1961) 1013.
- 10) R. S. Knox : Biophys. J., 9 (1969) 1351.
- 11) 竹内英晃ら：日本太陽エネルギー学会第8回研究発表会講演論文集，(1982) 189.

記号表

A (—)	集熱部と受光部の面積比
D (W/m ²)	受光面積当たりの正味取得エクセルギー流
E (W/m ²)	受光面積当たりの日射エクセルギー流
E_d (W/m ²)	受光面積当たりの法線面直達日射エクセルギー流
E_s (W/m ²)	水平面散乱日射エクセルギー流

G (W/m ²)	受光面積当たりのエクセルギー取得系の取得エクセルギー流
R (W/m ²)	受光面積当たりの消費系に供給されるべき必要最低エクセルギー流
T (W/m ²)	受光面積当たりの追尾以外の必要動力
U (W/m ² ·deg)	集熱部面積当たりの全熱損失係数
W (W/m ²)	受光面積当たりの追尾必要動力
r (—)	$=E_d/(E_d+E_s)$
Θ (K)	集熱部上限温度
α (—)	法線面全日射エクセルギー流の直達成分割合
γ (—)	エクセルギー有効比
ε (—)	エクセルギー効率
ε_d (—)	直達日射エクセルギー流によるエクセルギー効率
ε_0 (—)	光量子変換系の固定エクセルギー効率
η (—)	エネルギー効率
η_d (—)	直達日射エネルギー流によるエネルギー効率
η_0 (—)	光量子変換系の固定エネルギー効率
θ_a (K)	系のおかれた等価外気温度
θ_p (K)	集熱部平均温度
θ_s (K)	太陽の放射輝度温度
κ (—)	光学系の光学的効率
λ (—)	W の G に対する割合
φ (rad)	直達光の水平面への入射角度
ω (rad/hr)	太陽の移動の角速度 = 15°/hr
^	エネルギー量であることを表わす冠記号

(昭和59年2月2日 原稿受理)

国際会議ご案内

SECOND WORKSHOP ON SOLAR ASSISTED HEAT PUMPS
WITH GROUND COUPLED STORAGE

(地下蓄熱・太陽熱ヒートポンプ第2回国際会議)

論文募集

主催者：C E C と I E A

期日：1985年5月8—10日

場所：オーストリア、ウィーン市

連絡員：落藤 澄 北海道大学工学部衛生工学科 教授

(〒060 札幌市北区北9条西9丁目 TEL: 011-711-2111)

論文概要：英文250—300語

同締切：1984年11月1日