第5章　太陽電池のエネルギー変換効率の上限

黒体放射の熱力学の応用として、太陽電池のエネルギー変換効率の上限を議論する。エクセルギーによる議論と移動量による議論と行う。

5.1　はじめに

太陽電池は入射光エネルギーを電力に変換する素子であり、その歴史は19世紀末に発明されたセレン光電池まで遡ることができる。セレン光電池は1960年台までカメラの露出計などに使われたが、シリコン型光電池の普及とともに市場から姿を消した。

太陽電池は太陽から降り注ぐ光エネルギーを電力に変換して出力する。太陽から地上に降り注ぐ光エネルギーは莫大な量で1.8×10^{17}Wと推定されている。このエネルギーを全て電気エネルギーに変換出来るとすると、わずか1時間で、1年間に人類が消費している全エネルギーが賄える。このために変換効率の高い太陽電池の開発が進められている。

「熱」を「仕事」に変換する熱機関には上限があり、カルノー効率と呼ばれているが、太陽電池は太陽から地上に降り注ぐ光のエネルギーを全て電力に変換することができるのだろうか。太陽電池が太陽光を電力に変換する効率にも上限があるとすればこの効率はどの程度だろうか。

5.2　太陽電池の変換効率

太陽電池に太陽光を照射しながら、負荷抵抗を変えて太陽電池の出力電圧と出力電流を測定すると図5.1のようになる。横軸は出力電流Iであり、出力端子を短絡したときの電流（short-circuit　current）I_{sc}は入射光強度にほぼ比例する。縦軸は出力電圧Vであり、出力端子を開放したときの電圧（open-circuit voltage）V_{oc}は入射光強度にあまり依存しない。同じことだが、負荷抵抗$R_L\equiv V/I$が零の極限の出力電流がI_{sc}であり、R_Lが無限大の極限の出力電圧がV_{oc}である。太陽電池の内部抵抗

$$R_{in} \equiv \frac{V_{oc} - V}{I}$$

は出力電流Iの増加関数であり、$I = I_{sc}$で最大値V_{oc}/I_{sc}となる。

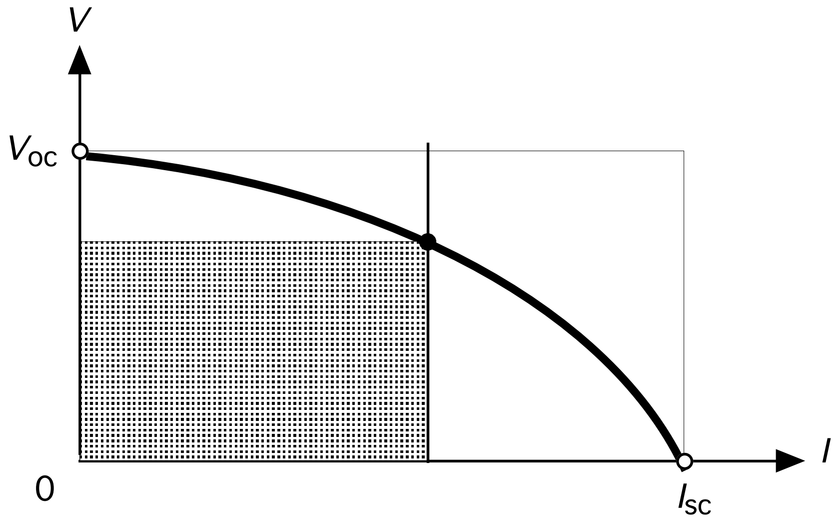

図5.1　太陽電池の出力電流電圧曲線：出力開放端子間電圧V_{oc}は入射光強度にあまり依存しないが、出力端子を短絡したときの電流I_{sc}は入射光強度にほぼ比例する。I_{sc}は入射光強度にほぼ比例することはカメラの露出計などの光検出器に使われる。太陽電池の負荷抵抗を調節すると負荷抵抗への出力電力$V\,I$が変化する。太陽電池の内部抵抗による発熱は$\left(V_{oc} - V\right) I$なので、太陽電池の発電量は$V_{oc}\,I$である。

太陽電池は内部抵抗により$R_{in}\,I^2 = \left(V_{oc} - V\right) I$だけ発熱し、負荷抵抗$R_L$による発熱は$R_L\,I^2 = V\,I$である。従って、太陽電池の出力電流$I$に関わる発熱量は

$$R_{in}\,I^2 + R_L\,I^2 = V_{oc}\,I$$

である。別の言い方をすると、太陽電池の発電量$V_{oc}\,I$のうちで、$V_{os}\left(I_{sc} - I\right)$が太陽電池内部で消費され、負荷抵抗に出力されるのは$V\,I$だけである。

太陽電池の出力電力$V\,I$の出力電流I依存性を調べよう。$I = 0$では発電量も負荷抵抗に出力する電力も零である。Iの最大値はI_{cs}なので、太陽電池の最

大発電量は$V_{oc}\,I_{sc}$であるが、これを全て内部抵抗での発熱に使うので、負荷抵抗に出力する電力は零である。こういう訳で、出力電力$V\,I$が最大となるような出力電流が存在する。

太陽電池の変換効率を次のように定義することは自然だろう：

太陽電池から出力される電力÷太陽電池に入射するエネルギー流

太陽電池に入射するエネルギー流は直接測定するかシュテファンの法則を使って推定すればよい。

現実の太陽電池の変換効率は素材、構造、表面処理などに依存するが表5.1から明らかなように10-30％程度とされている。さらに2006年以降には変換効率40%前後の太陽電池を開発したとの記事もあるが、太陽電池の変換効率を具体的にどのように評価したのかが記されていないことが多い。

表5.1　太陽電池の変換効率(桑野幸徳、中野昭一、岸　靖雄、大西三千年『太陽電池とその応用』(パワー社、1994))

	変換効率、％
単結晶Si	24
多結晶Si	17
アモルファスSi	12
単結晶Ga-As	29
単結晶In-P	19
CdS/CsTe	12
CdS/$CsInSe_2$	14

5.3　エクセルギーによる議論

図5.2のような思考実験装置を想定する。円筒の片側を温度Tの熱浴で閉じ、他端を太陽電池で閉じる。この円筒の内面は白体でできている。太陽電

池の背面は温度$T_S \left(< T\right)$の熱浴と接していて、太陽電池（solar　cell）の温度はT_Sに保たれている。添字Sはsolar　cellあるいはsurroundingの頭文字を表す。円筒内部の空間は真空とする。太陽電池には適当な負荷抵抗がついていて、太陽電池の出力電力を吸収することができるものとする。

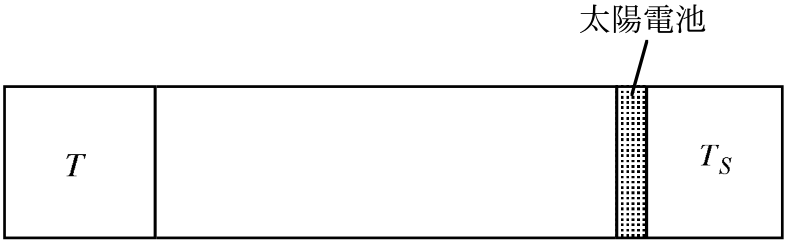

図5.2　思考実験装置

まず初めに太陽電池の表面を白体の幕で覆って、円筒内部に温度Tの黒体放射を満たす。次に温度Tの熱浴の表面も白体の幕で覆う。このようにしても、円筒内部に満たされた放射は温度Tのままである。円筒内部の放射は外界から完全に隔離されているからである。この状況で円筒内部の放射のエネルギーとエントロピーとをそれぞれU、Sとすると、UとSとは温度Tのみの関数である。最後に太陽電池の表面を覆っていた白体の幕をとり除くと、円筒内部の放射は太陽電池と相互作用し、最終的には温度T_Sの黒体放射になる。この間に太陽電池は電力を負荷に供給する。

この思考実験では、太陽電池の吸収率が有限であればよい。

上記の思考実験で黒体放射が初期温度Tから環境温度T_Sになるまでにどれだけの化学的仕事をすることが可能か考えよう。初期温度Tは環境温度T_Sとは異なるので、初めの状態は全体としては非平衡状態である。この非平衡状態から温度T_Sの平衡状態に移行する間に黒体放射が行う仕事には上限がある。この上限Eは、熱力学第二法則により、黒体放射と温度T_Sの熱浴とを併せた系のエントロピーが変化しない場合に黒体放射が行う化学的仕事であり、温度Tの黒体放射が温度T_Sの環境に置かれたときのエクセルギー

$$E(T, T_S) \equiv U(T) - U(T_S) - T_S\left[S(T) - S(T_S)\right] \tag{5.1}$$

に等しい。ここで黒体放射の体積が一定なので、環境圧力を指定する必要がない。

黒体放射が初期温度Tから環境温度T_Sになるまでに、円筒内部に満たされた放射のエネルギーは$U(T) - U(T_S)$だけ減少する。$U(T) - U(T_S)$に対する出力仕事の割合をエネルギー変換効率と定義すると、エネルギー変換効率の上限は

$$\eta_{exel} \equiv \frac{E(T, T_S)}{U(T) - U(T_S)} \tag{5.2}$$

である。(5.1)を使うと

$$\eta_{exel} = 1 - \frac{S(T) - S(T_S)}{U(T) - U(T_S)} T_S$$

となる。

黒体放射の性質を使ってη_{exel}を評価しよう。任意の温度Tの黒体放射では、エントロピーとエネルギーとの間に

$$S(T) = \frac{4}{3}\frac{U(T)}{T} \tag{5.3}$$

の関係がある。これを使うと

$$\eta_{exel} = 1 - \frac{4}{3}\frac{\frac{T_S}{T}U(T) - U(T_S)}{U(T) - U(T_S)} = 1 - \frac{4}{3}\frac{\frac{T_S}{T} - \frac{U(T_S)}{U(T)}}{1 - \frac{U(T_S)}{U(T)}}$$

となる。最後に、黒体放射のエネルギーは温度の 4 乗に比例するというシュテファン-ボルツマンの法則を使うと

$$\eta_{exel} = 1 - \frac{4}{3}\frac{1 - \left(\frac{T_S}{T}\right)^3}{1 - \left(\frac{T_S}{T}\right)^4}\frac{T_S}{T} \tag{5.4}$$

となる。(5.4)を変形すると

$$\eta_{exel} = 1 - \frac{4}{3}\frac{1 + \frac{T_S}{T} + \left(\frac{T_S}{T}\right)^2}{1 + \frac{T_S}{T} + \left(\frac{T_S}{T}\right)^2 + \left(\frac{T_S}{T}\right)^3}\frac{T_S}{T}$$

となる。ここで

$$0 < \frac{T_S}{T} \leq 1$$

では

$$1 < \frac{1 + \frac{T_S}{T} + \left(\frac{T_S}{T}\right)^2}{1 + \frac{T_S}{T} + \left(\frac{T_S}{T}\right)^2 + \left(\frac{T_S}{T}\right)^3} \leq \frac{3}{4}$$

であることに注意すると、

$$\eta_{exel} \leq 1 - \frac{T_S}{T} \qquad (5.5)$$

となる。つまり、温度Tの高温熱浴と温度T_Sの低温熱浴との間で働く理想的熱機関のカルノー効率

$$\eta_{\mathrm{Carnot}} \equiv 1 - \frac{T_S}{T} \qquad (5.6)$$

よりも小さい。

５．４　移動量による議論

前節の思考実験ではエクセルギーを使って太陽電池の変換効率の上限を議論したが、この議論は実験状況と対応していないという点で問題である。前節の思考実験では円筒内に満たされた温度Tの黒体放射が環境温度T_Sの黒体放射に変化する際の最大仕事を調べたので、定常状態の問題を非定常状態の問題にすり替えている。これでは太陽電池の効率を調べたことにはならない。太陽電池の効率を調べるなら温度T_Sの太陽電池に温度Tの黒体放射が定常的に入射し続ける状況で、定常的に出力し続ける出力仕事を調べる必要が

ある。

定常状態では移動量の値が有限なので、定常状態の問題を議論するには、移動量に着目する必要がある。熱力学の第一法則と第二法則とに関わる移動量はエネルギー流とエントロピー流なので、まず、黒体放射のエネルギー流束とエントロピー流束を議論する。温度Tの黒体面から放射されるエネルギー流束は

$$\tilde{U} = \frac{1}{4} U c = \sigma T^4$$

である。これはシュテファン・ボルツマンの法則そのものであり、σはシュテファン・ボルツマン定数である。温度Tの黒体面から放射されるエントロピー流束は

$$\tilde{S} = \frac{1}{4} S c = \frac{4}{3} \sigma T^3$$

である。

温度T_Sの太陽電池は入射エネルギー流束を、反射することなく、全て吸収するとする。つまり、太陽電池は温度T_Sの黒体とする。

温度T_Sの黒体は

$$\tilde{U}_S = \sigma T_S{}^4$$

だけのエネルギー流束と

$$\tilde{S}_S = \frac{4}{3} \sigma T_S{}^3$$

だけのエントロピー流束を放射する。

このために、温度Tの黒体は差し引き

$$\Delta\tilde{U} \equiv \tilde{U} - \tilde{U}_S = \sigma \left(T^4 - T_S{}^4\right)$$

だけのエネルギー流束と

$$\Delta\tilde{S} \equiv \tilde{S} - \tilde{S}_S = \frac{4}{3} \sigma \left(T^3 - T_S{}^3\right)$$

だけのエントロピー流束を放出し、温度T_Sの黒体は$\Delta\tilde{U}$だけのエネルギー流束と$\Delta\tilde{S}$だけのエントロピー流束を吸収する。

黒体がその温度を維持していることは、黒体はその温度の熱浴に接していることを意味する。温度Tの熱浴が放出するエントロピー流束は

$$\Delta\tilde{S} + \frac{\Delta\tilde{U}}{T}$$

であり、温度T_Sの熱浴が吸収するエントロピー流束は

$$\Delta\tilde{S} + \frac{\Delta\tilde{U}}{T_S}$$

なので、全系のエントロピー生成は差し引き

$$\frac{\Delta\tilde{U}}{T_S} - \frac{\Delta\tilde{U}}{T} = \left(1 - \frac{T}{T_S}\right)\frac{\Delta\tilde{U}}{T_S}$$

である。これは明らかに正である。全系のエントロピー生成が正なのは非平衡状態の特徴である。

太陽電池に入射されるエネルギー流束$\Delta\tilde{U}$が全て太陽電池で吸収されるわけではない。太陽電池表面で反射されたり、太陽電池を透過したりするので、吸収率をεとすると太陽電池が吸収するエネルギー流束は$\varepsilon\,\Delta\tilde{U}$である。

$\varepsilon\,\Delta\tilde{U}$の一部分は電力に変換されるが、直ちに内部抵抗と負荷抵抗で熱に変換されて熱浴に吸収される。残りは電力に変換されずに直接的に熱に変換されて熱浴に吸収される。内部抵抗での発熱量は$\left(V_{oc} - V\right) I$であり、負荷抵抗での発熱量は$V\,I$なので、一旦電力に変換されてからから熱に変換されるエネルギー流束は太陽電池の発電量$V_{oc}\,I$に等しい。負荷抵抗を変えることで出力電流を変化させると、出力電流の最大値は出力短絡電流I_{sc}なので、太陽電池の最大発電量は$V_{oc}\,I_{sc}$である。従って、

$$V_{oc}\,I_{sc} = \varepsilon\,\Delta\tilde{U}$$

すなわち、電力に変換されることなく直接的に熱に変換されて熱浴に吸収さ

れるエネルギー流束は

$$\varepsilon \Delta\tilde{U} - V_{oc} I = V_{oc}\left(I_{sc} - I\right)$$

である。

　太陽電池の変換効率は

$$\eta \equiv \frac{V I}{\Delta\tilde{U}} = \varepsilon \frac{V I}{V_{oc} I_{sc}}$$

であり、出力電力$V I$の最大値を$(V I)_{\max}$とすると、変換効率の最大値は

$$\eta_{\max} = \varepsilon \frac{(V I)_{\max}}{V_{oc} I_{sc}}$$

である。$(V I)_{\max} < V_{oc} I_{sc}$なので

$$\eta_{\max} < \varepsilon$$

である。つまり、太陽電池の変換効率の最大値$\eta_{\max}$は吸収率εを越えることがない。しかし、εを1に近づけることはできるし、内部抵抗をゼロに近づけることもできるだろう。従って、太陽電池の効率の熱力学的上限は 1 である。

５.５　まとめ

　黒体放射を電気エネルギーに変換する太陽電池のエネルギー変換効率の上限を議論した。エクセルギーに着目した議論とは異なり、移動量に着目した議論は定常状態という現実に即している。