

第 1 章

太陽光と太陽電池 (入門編)

地球に降りそそぐ太陽光のパワーはどのくらい？
光を電気に変える太陽電池セルの変換効率はどうやって求める？
変換効率は100%にできないってホント？
などなど、太陽光発電の基礎に関する疑問に答えます。



いまなぜ太陽電池か① 南極の氷が証言するCO₂の急増

南極の氷床に閉じ込められた大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度を測定すると、**図1**に示すように、18世紀末には280ppmくらいだったものが、20世紀になると300ppmを超え、1960年くらいから急増して、21世紀には350ppmを超えています。気象庁の2010年の発表では390ppmに達しています。地球の平均気温はさまざまな要因で変化していますが、**図2**の(a)に示すように100年間に0.74℃上昇し、その変化のしかたはCO₂濃度の変化曲線と傾向がよく似ているのです。

なぜCO₂濃度が地球の温度を上げるのでしょうか？ それは、本来地球から宇宙に向かって放射していた赤外線、空気中のCO₂が吸収するために、地球があたかも巨大なビニールハウスみたいになっているのが原因だといえます。これを英語で「Green House Effect」といい、日本では**温室効果**と呼んでいます。

CO₂は、おもに石炭や石油などの化石燃料を燃やすことによって発生します。私たちは炊事や温水シャワー、冷暖房に電気を利用していますが、その電気の半分以上は火力発電で供給されています。したがって、人類はCO₂排出量の削減に取り組まなければなりません。

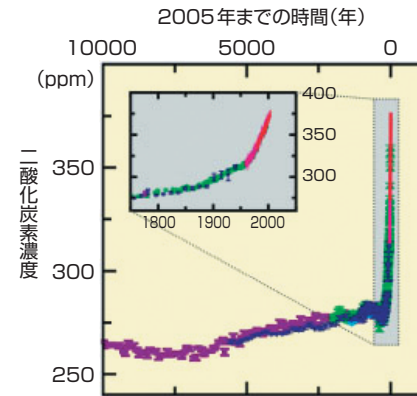
2009年1月、アメリカのオバマ大統領はそれまでの政策を転換して、低炭素社会を目指す「グリーンニューディール」を提唱しました。そして、2009年9月、鳩山由紀夫首相(当時)は国連総会で、日本は2025年までに温室効果ガスの排出量を25%減らすと約束しました。

それゆえ私たちは、必要なエネルギーを化石燃料以外の手段に求めなければなりません。その候補として原子力発電がありますが、2011年の震災にともなう原子力発電所の事故のように、安全性に問題があります。そこで注目されるのが、**再生可能エネルギー**です。



- 二酸化炭素(CO₂)は、地球に「温室効果」をもたらす
- CO₂はおもに化石燃料を燃やすことによって生じる

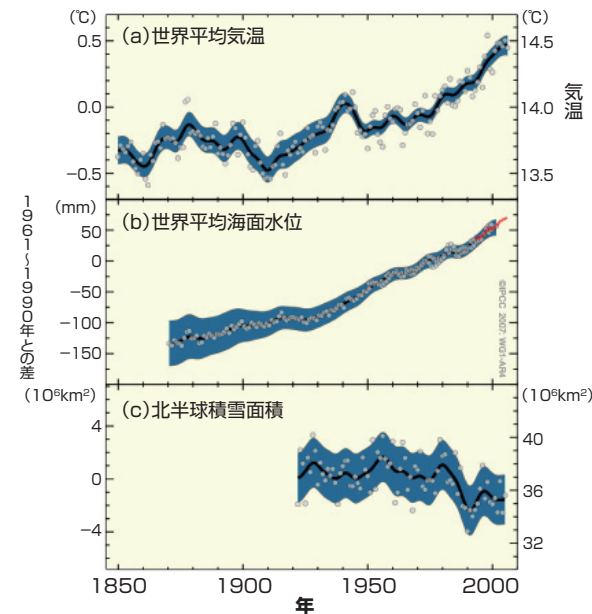
図1 大気中の二酸化炭素濃度の推移



過去1万年の二酸化炭素の大気中濃度の変化を示している(図中の拡大図は1750年以降の変化)。1960年以前のデータは、南極の氷床に閉じ込められた二酸化炭素ガスの測定から得られたものだ(異なる色の印は異なる研究を表す)。1960年以降のデータ(赤線)は空気中の二酸化炭素の測定値で、1900年ころから最近100年間に急増していることがわかる

出典：IPCC 第四次報告書(2007)

図2 観測値の変化



世界の平均気温は、1900年ころまで13.7℃±0.2℃で変動してきたが、2005年までの100年間に約0.74℃上昇した

青の点は潮位計のデータで、赤線は人工衛星から測定したもの。2005年までの100年間に約150mm増大したことがわかる

積雪面積は、80年間に日本の国土の約5倍にあたる約200万km²減少した

出典：IPCC 第四次報告書(2007)

いまなぜ太陽電池か② 再生可能エネルギーの中でもっとも手軽

化石燃料である石炭、石油、天然ガス、および原子力燃料のウランは、**枯渇性エネルギー**と呼ばれます。これに対して、自然界で繰り返されるエネルギーの流れに由来し、かつこれを利用すると同等以上の速度で再生されるエネルギー源を、**再生可能エネルギー**と呼びます。

再生可能エネルギーのもとには、太陽および月です。太陽のエネルギーは、**図1**に示すように、直接的には太陽熱温水器、太陽電池、間接的には水の循環、風の循環を通じて水力発電、風力発電、ヨットなどに利用されるほか、太陽の恵みで成長した植物を通じてバイオマス、バイオエタノールにもなります。また、月の引力で起きる潮位の変化や潮流、地球内部のマグマによる地熱を利用した発電もあります。

水力発電を除く再生可能エネルギーを、**新エネルギー**と呼んでいます。新エネルギーの総量は、一次エネルギーの総供給の3%にすぎません。それも、半分以上が廃棄物発電などで、太陽光の直接利用はそれほど進んでいません。

本書の主題である太陽電池は、出力を電気エネルギーとして取りだせるので、太陽の熱利用に比べて使い勝手がよいのが特徴です。光を電気に変えるには、**光起電力効果**という半導体の物理現象を使っています。くわしくは(011)および第6章に述べますが、ここではざっくりと説明しておきます。半導体というのはICチップなどに使われている材料です。これに光をあけると、プラスとマイナスの電荷が生じます。この電荷を分離してやれば、外部回路に電気が取りだせます。このためにはちょっとしたしかけが必要です。このしかけが**pn接合ダイオード**です。半導体にはp型とn型とがあって、この組み合わせを使って初めて、電荷を分離し光起電力として取りだせるのだということを覚えておいてください。



- 自然のエネルギーの流れに由来し、再生されるのが再生可能エネルギー
- 温水器、太陽電池、水力発電、風力発電などが太陽光由来

図1 太陽など自然の恵みがもたらす再生可能エネルギー

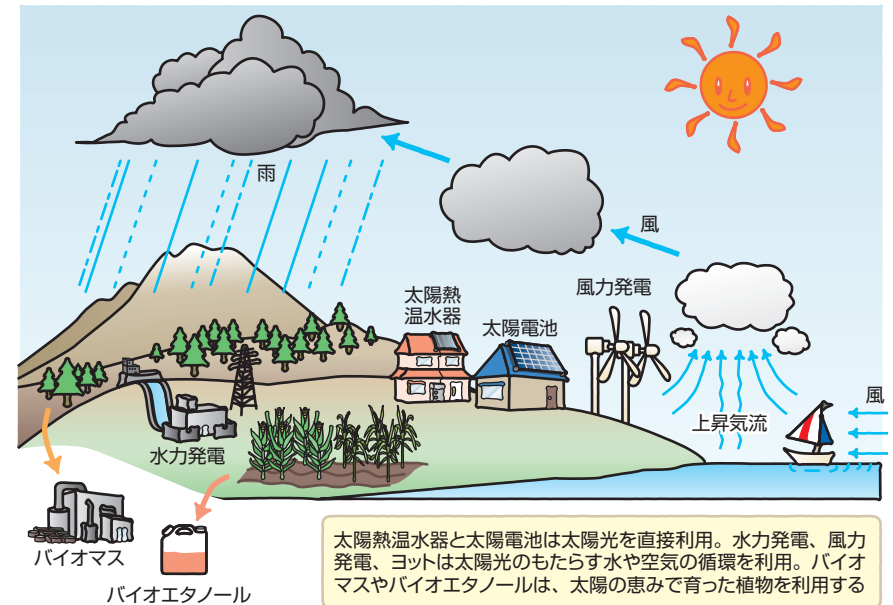
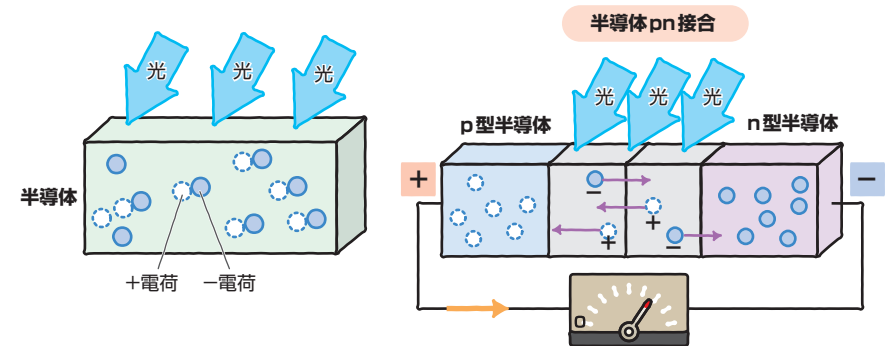


図2 太陽電池の発電の原理



半導体に光をあけるとプラスとマイナスの電荷のペアができるが、発電はしない(左)。pn接合というしかけをつくと、プラスとマイナスが分かれて電気を取りだせる(右)

用語解説

一次エネルギー → 化石燃料、ウラン、太陽光など、自然から直接得られるエネルギー源。
電気、都市ガス、ガソリンなど加工して得られるものを二次エネルギーという

003

地球に降りそそぐ太陽光のパワーは 1.37kW/m²

太陽電池は、太陽の光を受けて発電するしかけです。そのため、太陽電池について学ぶ前に、太陽光がどれくらいのパワーをもっているのかを見積もっておく必要があります。あとで太陽電池の変換効率について学ぶときに、役立ってくれるでしょう。

1m²(平方メートル)の地面に降りそそぐ太陽光のパワーが、何ワット(W)になるのか計算してみましょう。太陽は半径約6.96×10³kmのガスの天体です。太陽は、水素原子が核融合によってヘリウム原子に転換されるときに、熱エネルギーを放出しています。この高温の太陽表面から1秒間に黒体放射される光のエネルギーは3.85×10²⁶J(ジュール)なので、太陽のパワーは3.85×10²⁶Wです。地球の大気圏外に降りそそぐパワー密度Pは、太陽を中心とする半径1.496×10¹¹mの球の表面積4π×(1.496×10¹¹m)²で割って、

$$P = \frac{3.85 \times 10^{26} [\text{W}]}{4\pi \times (1.496 \times 10^{11} [\text{m}])^2} \approx 1.37 [\text{kW/m}^2]$$

となります。これを**太陽定数**といいます。

地表に届く光のパワー密度は、空気層の層を通過するため、窒素、酸素、水蒸気、二酸化炭素などの分子による吸収を受けて、大気圏外の値Pより弱くなっています。通り抜けてくる空気層の量を**エアマス**(AM)といい、大気圏外ではAM-0、天頂から垂直に入射する場合をAM-1、中緯度地帯では1.5倍の空気層を通過してと考えるとAM-1.5と呼んでいます。AM-1.5の太陽光のパワー密度は約1kW/m²です。

もし変換効率100%の太陽電池があったとしましょう。受光面積が1m²ならば、最大1kWの電力が取りだせるはずですが、実際の家庭用の太陽電池の変換効率は10~20%ですから、一辺1mの正方形の太陽電池から取りだせるのは100~200Wです。



- 地球の大気圏外に降りそそぐ太陽光のパワー密度Pは1.37kW/m²
- 地表での太陽光のパワーは、大気の吸収のため約1kW/m²になる

図1 地球に降りそそぐ太陽光のパワーを計算する

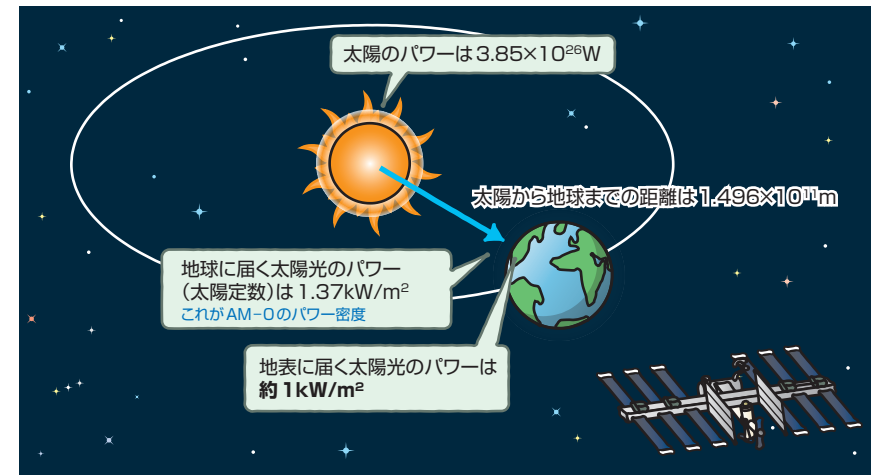
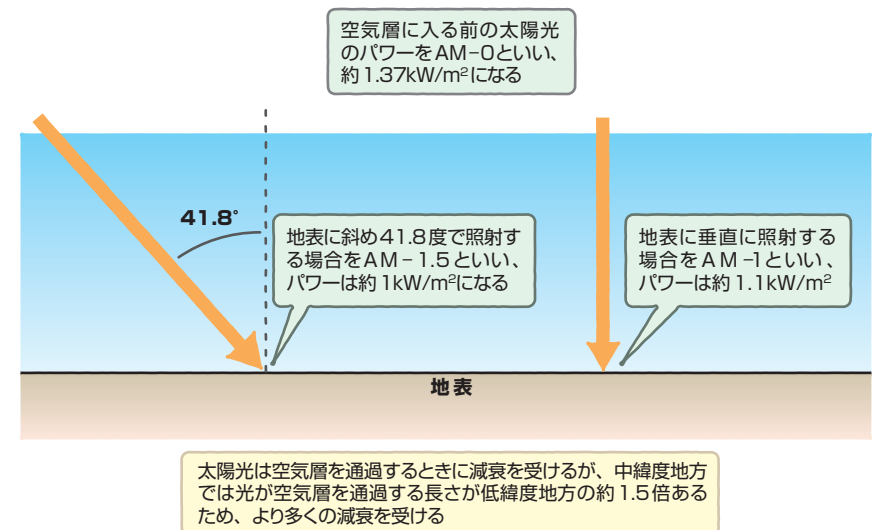


図2 地上に降りそそぐパワーの計算



用語解説

エネルギーとパワー → エネルギー(単位J:ジュール)の流れをパワー(単位W:ワット)という。1秒間に1Jのエネルギーが流れた場合、そのパワーは1Wとなる。W=J/s

地球が太陽から受けるエネルギーは 石油換算で年間100兆トン

(003) で計算したように、太陽からは毎秒 1m^2 あたり 1.37kJ のエネルギーが地球に届いています。地球の投影面積 S は、地球の半径が $6.378 \times 10^6\text{m}$ なので、

$$S = \pi \times (6.378 \times 10^6 [\text{m}])^2 = 1.28 \times 10^{14} [\text{m}^2]$$

になり、地球が1秒間に太陽から受け取るエネルギー E は、

$$E = 1.37 [\text{kJ}/\text{m}^2] \times 1.28 \times 10^{14} [\text{m}^2]$$

$$= 1.75 \times 10^{14} [\text{kJ}] = 175000 [\text{TJ}] \text{ (テラジュール)}$$

になります。

1年間では、 $t = 365 \times 24 \times 3600\text{s} = 3.1536 \times 10^7 [\text{s}]$ を乗じて、 $5.52 \times 10^{24}\text{J}$ のエネルギーを受け取っていることになります。このうち約30%は雲などによって宇宙に反射されますから、実際に地球が受け取るのは $3.86 \times 10^{24}\text{J}$ です。

これを石油に換算すると、

$$1 \text{石油換算トン} = 41.9 [\text{GJ}] = 4.19 \times 10^{10} [\text{J}]$$

なので、毎年 9.22×10^{13} 石油換算トン (約100兆トン) のエネルギーです。このエネルギーによって水の循環が起き、雨をもたらします。水力発電はこの水を使います。太陽光は大気の循環をもたらします。風力発電はこの空気の移動を使います。人類は2007年において、117億石油換算トンの化石燃料(石炭や石油)を消費しますが、これらは何億年も前の生物が太陽光を受けて生育し、やがて化石になった、太古の太陽エネルギーの缶詰なのです。こうしてみると、私たちのエネルギー源のほとんどは、太陽に起源があることに気づきます。

人類がいまのエネルギー消費を続けると、2030年には年間171億石油換算トンが必要になると考えられています。それでも、太陽から受けるエネルギーに比べればずっと少ないのです。



- 地球が1年間に太陽から受け取る全エネルギーは $3.86 \times 10^{24}\text{J}$
- 石油に換算すると100兆トンに相当する

図1 地球が太陽から受け取るエネルギー

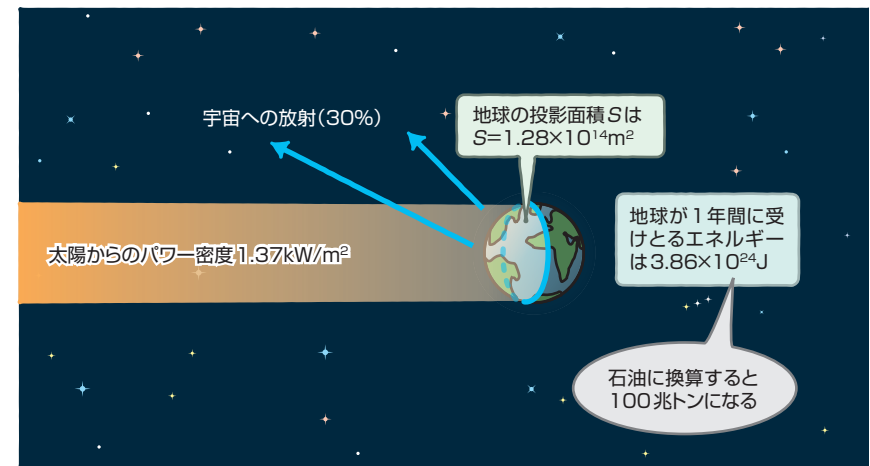


図2 化石燃料は太陽光の缶詰



何億年も前の生物が化石燃料になったので、いわば化石燃料は太陽光の缶詰である

用語解説

石油換算トン → 異なるエネルギー源の量の比較を行うときに用いる単位。石油1トンに相当する発熱量をもつエネルギー量を「1石油換算トン」という。この量は41.9ギガジュールに相当する

太陽光には見えない光も含まれる 太陽光のスペクトル①

図1には、地表における太陽光の放射強度のスペクトルを示しています。横軸は波長(nm)、縦軸は単位波長(nm)あたりの太陽光のパワー密度(単位 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)を表しています。これを見ると、太陽光のスペクトルは300nm付近から立ち上がり、500nm付近でピークとなって、長波長に向かっていくつかの凹凸をとまなげながら弱くなっていく、幅の広いスペクトルを示すことがわかります。なぜピークが500nm付近にあって、なぜ凸凹しているのかは(006)で説明します。

ヒトの目に見えるのは、**可視光線**と呼ばれる、うすく黄色で示した380~780nmの波長範囲です。どの波長が何色に見えるかは、図1の下に示してあります。380nmより波長の短い光のことを**紫外線(UV)**といい、目に見えません。また、780nmより波長の長い光は**赤外線(IR)**と呼ばれ、これも目に見えません。

このように、太陽から放射される光には、ヒトの目に見える可視光線だけでなく、目に見えない赤外線や紫外線も含まれています。その割合は、図1のグラフに見られるように、可視光線が52%で赤外線が42%と大半を占め、紫外線は約5~6%です。つまり、太陽光の半分は目に見えない光なのです。

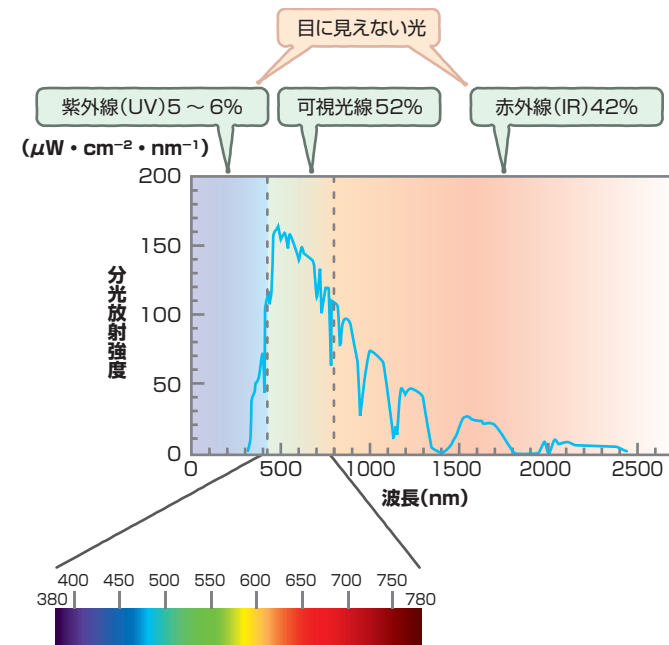
太陽電池には半導体が使われますが、後述するように、半導体はその特性で決まるしきい波長より短い波長の光しか電気エネルギーに変えることができないので、赤外線のパワーの大部分は利用していません。

このため、第2章の(026)でくわしく述べるように、しきい波長の異なる半導体を多層に重ねることによって、未使用の部分を減らし、太陽光を有効利用する**多接合タンデム構造**太陽電池が研究開発されています。



- 太陽光は、可視光線以外に目に見えない紫外線と赤外線も含んでいる
- 電気に変換できるのは半導体固有のしきい波長より短い波長の光のみ

図1 地上での太陽光の分光放射強度スペクトル



太陽光のスペクトルのピークは緑だが、青や赤の成分もたっぷり含まれていることがわかる。昼間の太陽に照らされた紙からの散乱光はさまざまな波長を幅広く含み、私たちは白と感じる。朝日や夕日のときは、空気層によるレイリー散乱のために青色の成分が散乱され、私たちの目に届かないので、太陽は赤く見える

太陽光のパワーの半分は目に見えないのです



用語解説

スペクトル → 光や電磁波の強さを波長や周波数に分けて示した図

太陽光には見えない光も含まれる 太陽光のスペクトル②

太陽光の表面温度は、絶対温度6000度(6000K)です。高温の物体からは黒体放射によって光が放出されます。黒体放射の光強度の波長分布(スペクトル)は、ある波長にピークをもちます。このピーク波長は、温度が高くなるにつれて波長の短い側にシフトします。ガスバーナーの炎でも、空気が多い低温の炎は赤く、ガスが多い高温の炎が青いのと同じ原理です。太陽は、シリウスB(11000K)のような青い星に比べると、温度の低い星なので赤いのです。

プランクの法則によって計算した6000Kでの黒体放射のスペクトルを、図1に示します。波長150nmあたりの紫外波長から立ち上がり、500nm付近にピークをもち、波長が長くなるとともに緩やかに減少していきなめらかなスペクトルです。

ところが、実際に大気圏外で測定した太陽光のスペクトル(AM-0)は、図2の紫色の線に示すように、でこぼこしています。くぼんでいるのは、太陽の気体に含まれる水素、ナトリウム、カルシウム、マグネシウム、鉄などの原子吸収(いわゆるフラウンホーファー線)によるものです。

さらに空気中を進んでくると、レイリー散乱のため、図2の青く塗った部分の外側の線のように1.0 μm より波長の短い可視光から紫外光が減衰します。さらに、オゾン層のオゾン(O₃)、空気中の水(H₂O)、酸素(O₂)、二酸化炭素(CO₂)などの気体の分子振動(薄い青の部分)による吸収を受けるため、地表に届く光は、濃青色のようにでこぼこしたAM-1のスペクトルになります。

なお、紫外線(UV)はオゾンによって吸収されるので、地表にはほとんど届きませんが、近年、フロンガスがオゾン層を破壊するので紫外線が増加して、皮膚がんの原因になると心配されています。



- 太陽光の放射強度スペクトルは6000Kでの黒体放射でほぼ説明できる
- 紫外光はレイリー散乱で減衰し、赤外光は気体分子により減衰する

図1 6000Kにおける黒体放射のスペクトル強度

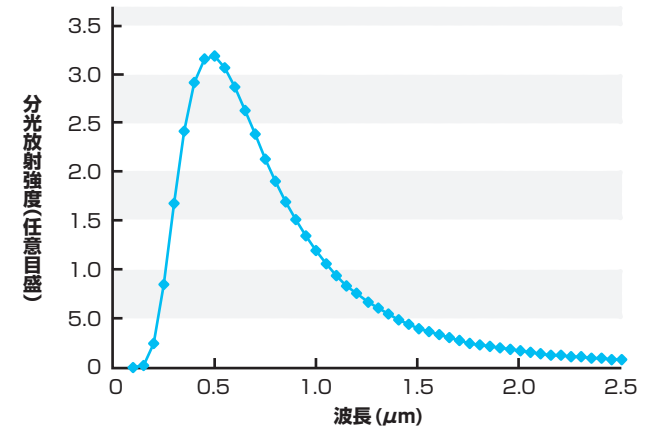
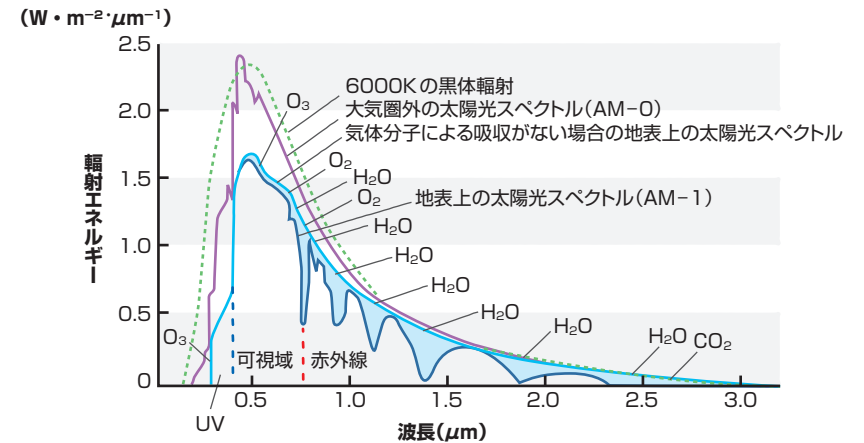


図2 大気を通じたときのスペクトルの落ち込み



地球上の大気を通ると、水(H₂O)、酸素(O₂)、二酸化炭素(CO₂)による吸収がディップ(落ち込み)となって見られる

(参考:『太陽光発電入門』濱川圭弘 著、オーム社、1981年)

用語解説

レイリー散乱 → 気体分子による光の散乱の確率は、光の波長の6乗に反比例するという法則。晴れた日の空は青く見えるのは、レイリー散乱によって波長の短い青や紫の光が散乱されるからである

季節や時間や天候で こんなに変わる太陽光のパワー

図1は、筆者の家で計測した、ある晴れた日の日射計(傾斜面26.5°)の出力(日射強度)の時間変化を表したものです。夜明けから時間がたつにつれ太陽が真上に近づくとともに日射強度が増大し、南中時に最大になったあと、午後は斜め方向から照らされるので小さくなり、日没とともに光量がなくなる様子が見られます。太陽光発電パネルを屋根に固定している場合には、発電出力は日射計とほぼ同じような時間変化をします。ある地点の日射の時間変化は、その地点の緯度経度、日時、太陽の高度、方位、パネルの傾斜角からシミュレーションによって計算することができます。この曲線の下での面積が、1日分の傾斜面日射強度になります^(注)。

図2は、筆者の家で計測した2008年9月の1日日射量(1日分の傾斜面日射強度を時間積分した光のエネルギー)の月変化です。1日中晴天の日には6kWh/m²の日射量がありますが、曇りの日は3kWh/m²程度、雨の日にも1kWh/m²近くあります。雨の日にも散乱光があるから、ゼロにはならないのです。

図3は、ある年の日射量の年変化です。雨の多い梅雨時と日照の弱い冬に低い数値を示しています。

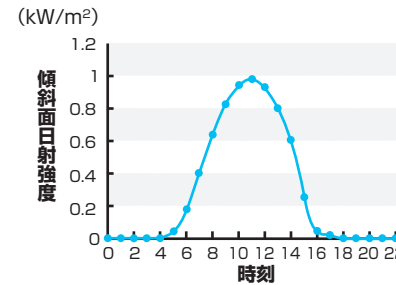
このように、太陽光や風力などの自然エネルギーは変動の大きいエネルギー源であることを知っておく必要があるでしょう。

自然エネルギーによる電力系統の変動を抑えるための対策として、IT技術で供給側と需要側のミスマッチをなくすとともに、蓄電池を組み合わせるスマートグリッドが検討されています。くわしくは第3章の(036)を参照してください。



- 太陽光の日射強度は時間とともに変化し、南中時にピークになる
- 雨の日も散乱光があるので、日射量はゼロにならない

図1 ある晴れた日の日射計の強度変化(筆者の家での測定結果)



筆者の家で測定した傾斜面(水平から26.5度だけ傾いた面)の日射強度。夜明けとともに立ち上がり、南中時(11時半ころ)ピークとなり、その後は減少して日没時とともにほぼゼロになる

図2 2008年9月の1日日射量の月変化(筆者の家で計測)

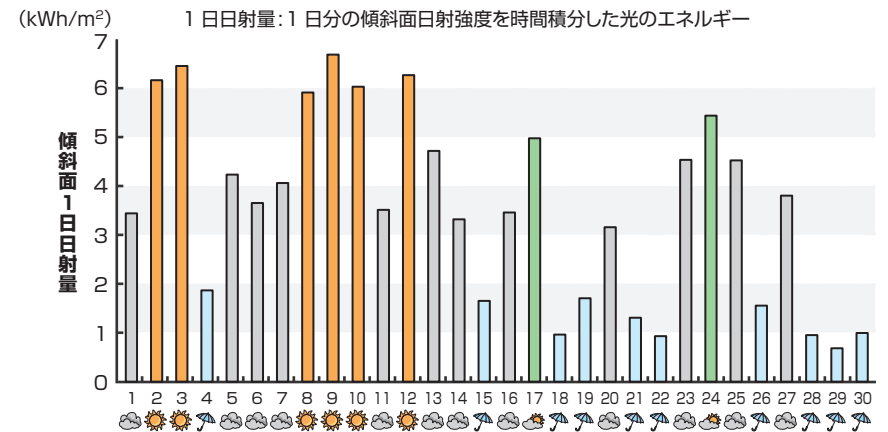
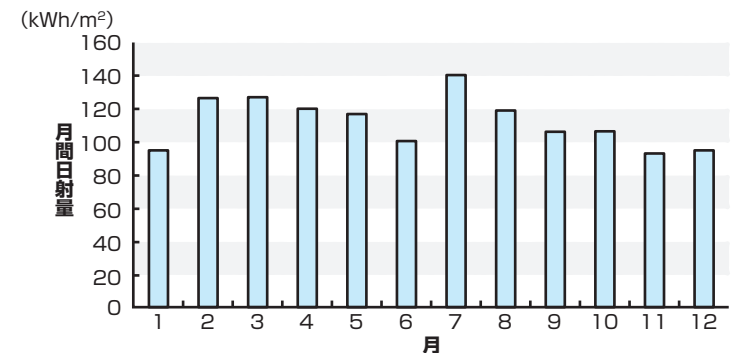


図3 ある年の月間日射量の年変化(筆者の家で計測)



注: 大規模太陽光発電施設(メガソーラー)では、パネルの向きを時間とともに変えて常に太陽光を追尾するようになっているため、太陽のでている間はほぼ一定の出力が得られる

太陽電池の歴史をひもとく そのルーツは19世紀に!

歴史をひもとくと、なんと1839年にA.E.ベックレルというフランスの学者が、のちに**ベックレル効果**と呼ばれる現象を発見しています。図1に示すように、電解液に2つの電極を置き、一方の電極に可視光線や紫外線を照射すると起電力が生じるのです。これは**色素増感太陽電池**(054参照)のルーツといえるでしょう。1883年になると、フリッツというアメリカの発明家が、セレン(Se)に薄い金の膜を被覆して光をあてると**光起電力**が生じることを発見しました。このときの変換効率は1%でした。

(002)で触れたpn接合にもとづく太陽電池の最初の特許は、1941年にアメリカでベル研究所のオールという技術者が「光センサーデバイス」として取得しています。トランジスタの発明に先立つこと10年も前のことでした。

最初の実用的な太陽電池は、1953年にベル研究所のピアスン、フラー、チャピンの3人の研究者によって、単結晶シリコンを用いて開発されました。当時の変換効率は2.5%でしたが、ベル研究所は1956年に6%の変換効率を達成しています。

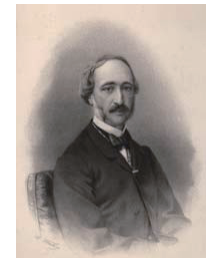
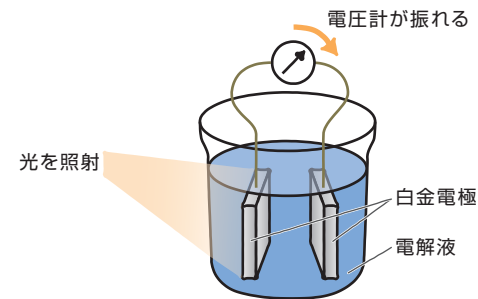
1958年には、アメリカが2番目の人工衛星バンガード1号に、電源として単結晶シリコン太陽電池を搭載しました(図2)。1990年代になると太陽電池の開発が進み、オーストラリアのニューサウスウェールズ大学で24.5%という高効率の単結晶シリコンセルが発表されましたが、その後は高効率を求める研究が下火になってしまいました。なお、現在、宇宙用に使われているのは、化合物半導体系多接合タンデムセル(026参照)です。これは35%という高い変換効率が報告されています。

太陽電池に使う半導体の量を減らし、製造にかかるエネルギーを減らすために、CIGS(CuIn_{1-x}GaxSe₂)など光吸収の強い半導体の薄膜を使った太陽電池が研究されています。実用化が進んでおり、いっそうの発展が期待されています。



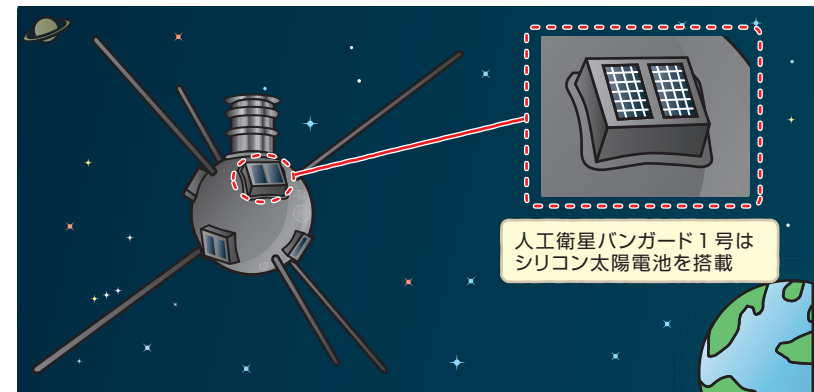
- 太陽電池のルーツは、19世紀の科学者ベックレルにさかのぼる
- 実用的なシリコン太陽電池は、20世紀半ばにアメリカで開発された

図1 ベックレル効果



A.E. Becquerel

図2 アメリカ初の人工衛星に搭載された太陽電池



バンガード1号の太陽電池は、半世紀経ったいまも働いているって、すごいですね

光を電気に変えるのは 太陽電池セルを構成する半導体

光を電気に変える基本ユニットは、**太陽電池セル**です。現在市販されている太陽電池のセルには半導体が使われていて、光のエネルギーの一部を電気のエネルギーに変えることができます。太陽電池は「電池」といっても、光がないとまったく電気が起きません。乾電池や蓄電池と違って電気を蓄える性質をもちませんから、正しくは「**太陽光発電器**」というべきものです。

半導体ってなんでしょう？ くわしくは第5章で説明しますが、半導体とは電気の流れやすさが「**导体**」と「**不导体**」(絶縁物)の中間にある物質で、导体に近い「電気抵抗率の低い状態」から、不导体に近い「電気抵抗率の高い状態」まで、幅広い範囲の値をもち、しかも、電気抵抗率を人工的に制御できるという特徴もっています。

半導体の代表がシリコン(ケイ素)です。シリコンの結晶は図1の左に並んでいる、銀色の金属光沢をもった円柱状のかたまり(インゴット)です。このインゴットをスライスしたものが、右にあるウェハーです。

シリコンウェハーから、図2に示したようなダイオードやトランジスタなどの半導体デバイス(素子)、さらには、微細な回路をつくり込んだCPUやDRAMなどの集積回路(IC)がつくられます。

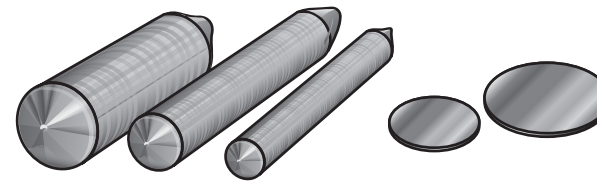
集積回路は、図3に示すように、テレビ、携帯電話、携帯音楽プレーヤー、コンピュータ、鉄道やバスのICカードなどの心臓部に使われ、日常生活になくてはならない存在であることはご存じのとおりです。

半導体は太陽電池の主演です。半導体を使って光を電気に変えるしくみについては、(010)で述べます。太陽電池には、第4章に述べるようにシリコンのほかガリウムヒ素、CIGSなどさまざまな半導体が使われています。



- 半導体のデバイスは、日常生活のあらゆるところに使われている
- 太陽電池材料としてもっともよく使われるのはシリコンである

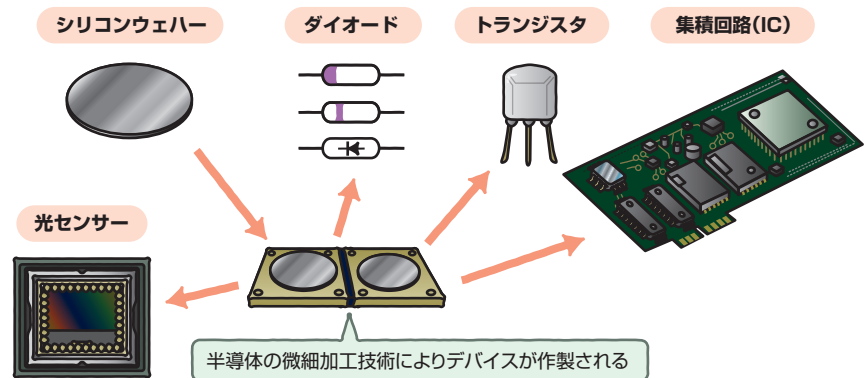
図1 半導体を代表するシリコン



左の円柱がインゴット、右がウェハー

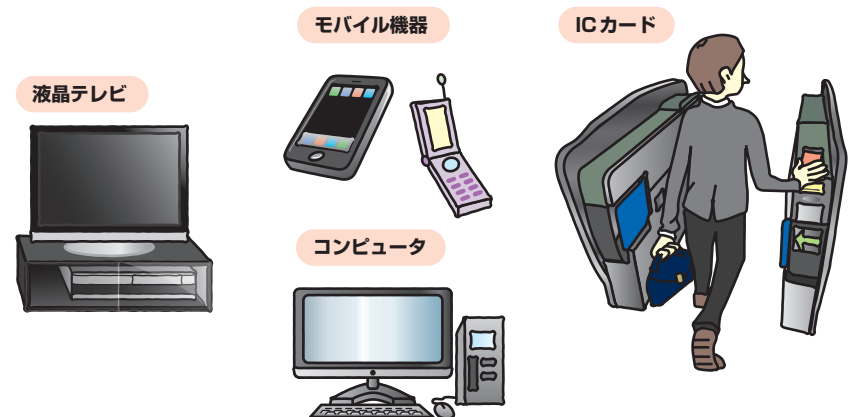
半導体というのは、電気の流れやすさが「**导体**」と「**絶縁体**」の中間にある物質。半導体の代表はシリコンである

図2 シリコンウェハーからさまざまな半導体デバイスがつくられる



半導体の微細加工技術によりデバイスが作製される

図3 半導体の集積回路が心臓部に使われるいろいろな製品



太陽電池セルの中身はpn接合ダイオード

図1は、シリコン太陽電池セルの心臓部であるpn接合ダイオードのしくみを模式的に描いたものです。図に示すように、n型シリコンとp型シリコンを重ね合わせたものです。純粋なシリコン結晶は電気抵抗が高く、電気が流れません。ところが純粋なシリコンにほんのわずかの不純物を添加すると、電気が流れるようになります。電気の運び手(キャリア)は、電子またはホール(電子の抜け穴)です。純粋なシリコンに微量のリンを添加すると、電子が電気を運ぶn型シリコン半導体になります。一方、微量のホウ素を添加すると、ホールが電気を運ぶp型シリコン半導体になります。

n型とp型をくっつけてpn接合をつくと、図2に示すように、整流性(p型側がプラスだと電流が流れ、n型側がプラスだと電流が流れない性質)をもったダイオードになります。

このダイオードに太陽光をあてると、n型側がマイナス、p型側がプラスになって電気を取りだすことができます。これが太陽電池です。太陽光発電に寄与するのは、n型シリコンやp型シリコンにもともと含まれている電子やホールではなく、光照射によってシリコンの中につくりだされた電子とホールの光キャリアです。これらの光キャリアは、pn接合をつくることによって接合の界面付近に生じるつくりつけの電位差(内蔵電位差)によって電子はn型側の電極に、ホールはp型側の電極に導かれ、p型がプラス、n型がマイナスになります。

なお、なぜリン添加でシリコンがn型になるのか、ホウ素添加でp型になるのかの理由については、第5章でくわしく述べます。また、pn接合をつくることによって内蔵電位差が生じるわけについては、次の(011)で説明します。

要点 Check!

- 太陽電池セルの心臓部は、半導体のpn接合ダイオードである
- pn接合に光をあてると余分の電子とホールができ内蔵電位差で分離する

図1 太陽電池セルを構成するpn接合ダイオードの成り立ち

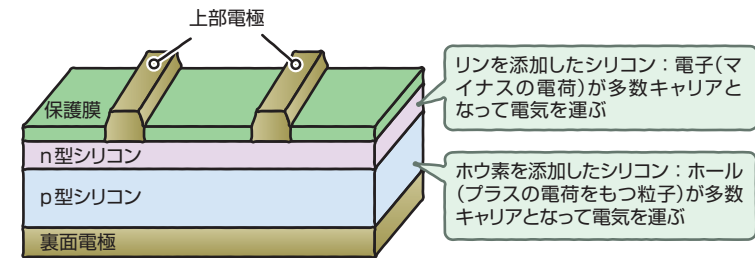


図2 pn接合ダイオードの整流性

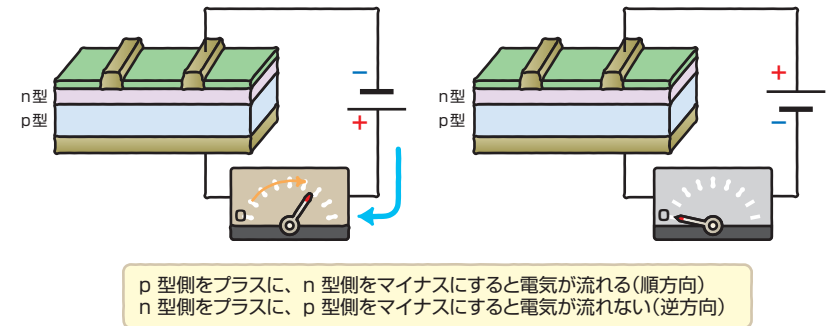
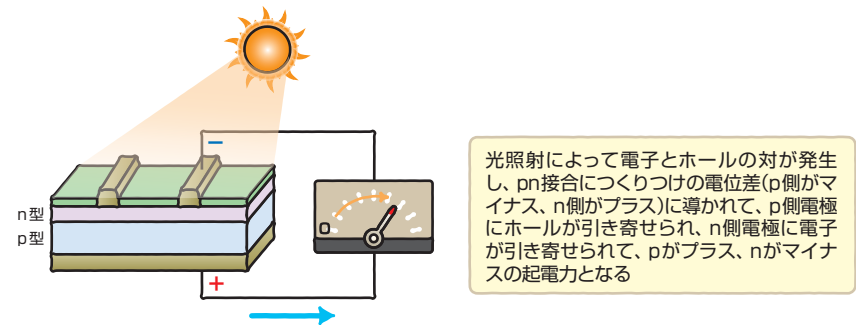


図3 pn接合ダイオードに光をあてると起電力が生まれる



太陽電池セルのpn接合ダイオードの働き

太陽電池の心臓部は半導体ですが、半導体(たとえばシリコン)単独では、光をあてただけで電気を取りだすことはできません。

図1に説明するように、光をあてると、光キャリアのペア(光電子と光ホール)が生じます。光をあてる前からあったキャリアに光キャリアが加わるので、電気伝導度が増加します。これを**光導電効果**といいます。光導電効果は、街灯が夜に自動点灯するしかけに使われています(055を参照)。しかし、この効果は光スイッチには使えても太陽電池にはなりません。

図2のように、p型半導体(ホールがおもなキャリアであるような半導体)とn型半導体(電子がおもなキャリアであるような半導体)をくっつけます。すると、p型半導体のホールはn型半導体に向かって流れ、n型側の電子はp型側に向かって流れます(これを**拡散**という)。拡散は、一般に濃度の違いがあると、濃度の濃いところから薄いところに物質が流れる現象です。赤インクを入れた水槽と真水の水槽をくっつけ、しきりを外すと赤インクが真水に向かって流れ、全体がピンクになるのと同じです。結合界面付近で電子とホールが出会うと電子がホールを埋めてキャリアが消滅し、キャリアのない領域の**空乏層**ができます。空乏層は、p型側にもn型側にも生じます。

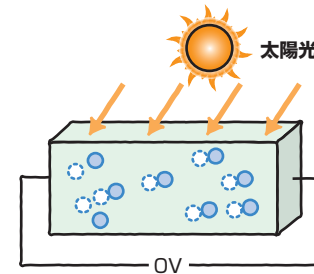
p型領域、n型領域はともにもともと電気的に中性でしたが、キャリアが少なくなることによって電荷バランスが崩れ、図2の下に示すように空乏層のp型側がマイナス、n型側がプラスに帯電し、**内蔵電位差**(拡散電位差とも呼ぶ)が生じます。

ここで、図3に示すように接合部に光があたると、光によって生成された電子とホールのペアはこの内蔵電位差によって分離し、n型側がマイナス、p型側がプラスに帯電し、この結果、**光起電力**が両端に現れます。

要点 Check!

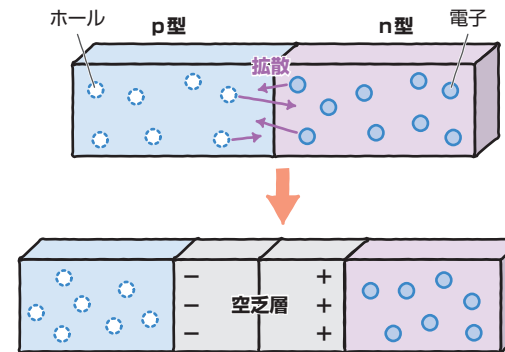
- 半導体のpn接合をつくると、接合界面には内蔵電位差が生じる
- 光電子と光ホールは内蔵電位差によって分離し、光起電力が生じる

図1 単独の半導体に光をあてただけでは光起電力は生じない



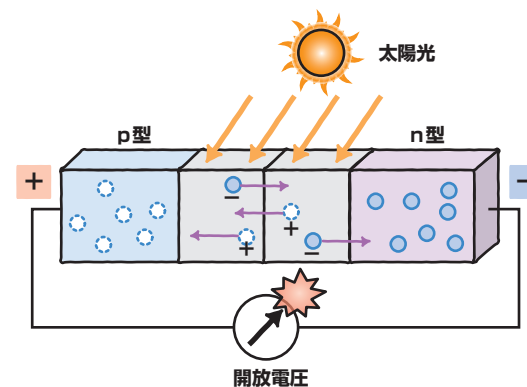
半導体に光をあてると、光キャリア対が生成される。半導体に光をあてただけでは、光キャリア対は分離しないので、両端に起電力は生じない(光をあてるとキャリアが増え、電気がよく流れるようになるので、電池をつなげば光電スイッチに使える)

図2 pn接合をつくると界面付近に内蔵電位差が生じる



空乏層では、電子もホールもなくなったためp型領域、n型領域とも電荷バランスが崩れ、p型側がマイナスに、n型側がプラスに帯電し、内蔵電位差が生じる

図3 pn接合に光をあてると光起電力が生じる



pn接合に光があたると、光によって生成された電子とホールは内蔵電位差によって分離し、n型側がマイナス、p型側がプラスに帯電して、光電子と光ホールの移動が起きる。これが光起電力となる

012 変換効率はどうやって求められるか

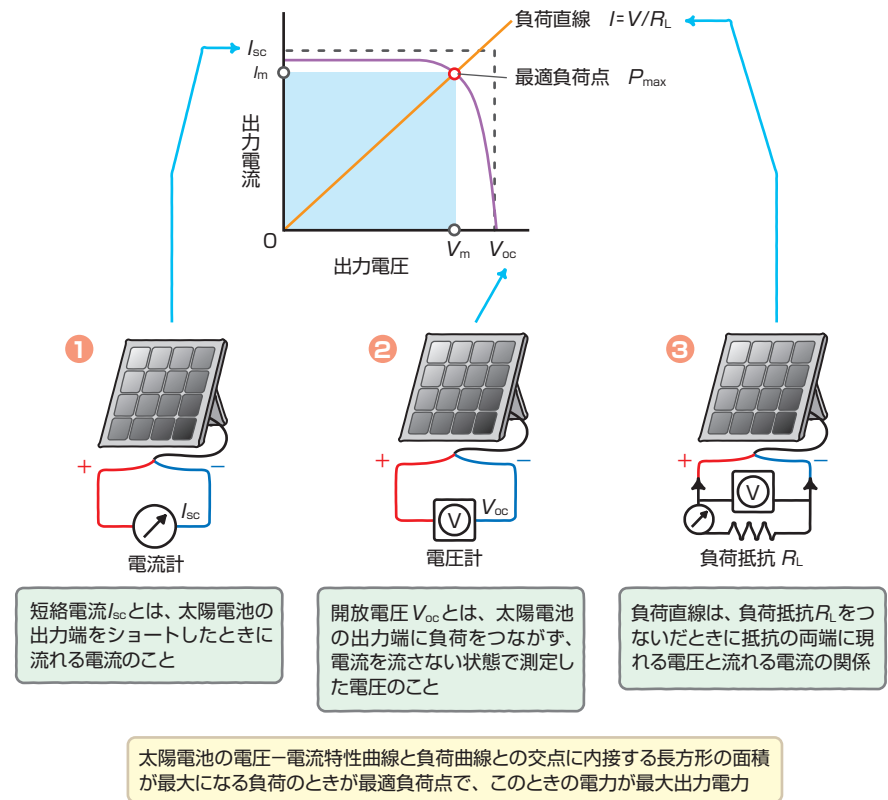
変換効率とは、太陽光のエネルギーの何%が電気エネルギーに変えることができたかを表す太陽電池の性能の尺度で、図1下の式①のように定義されます。

図1のグラフは太陽電池の出力電圧と出力電流の関係です。このグラフで I_{sc} と記したのは**短絡電流**です。短絡電流は図の①のように、太陽電池の端子間を電流計で短絡したときに流れる電流です。一方、 V_{oc} と記したのは**開放電圧**です。開放電圧は、図の②に示すように、太陽電池から電流を取りださずに電圧計で測定した電圧です。取りだせる電力は図1の青色四角形の面積で表されますが、実際の電圧-電流関係が曲線状になっているので、点線で示した長方形の面積 $V_{oc} \times I_{sc}$ より小さくなります。

図の③に示すように、太陽電池に負荷抵抗 R_L をつないだとき、両端の電圧と流れる電流の関係は $I = V/R_L$ で表される**負荷直線**になります。この負荷直線と電圧-電流特性曲線の交点に内接する長方形の面積 $V_m \times I_m$ を最大にする負荷のとき、**最適負荷点**に**最大出力電力 P_{max}** が取りだせるのです。この値を**受光パワー**(太陽光の放射強度 $E = 1\text{ kW/m}^2$ と太陽電池受光面積 A の積)で割って百分率で表したものが、式①に示される**変換効率 η** (イータ)です。受光面積 A として電極などを除く光電効果のある面積 A_i を用いた場合を**真性変換効率 η_i** 、太陽電池の全面積 A_e を用いた場合を**実効変換効率 η_e** といいます。実効変換率は真性変換効率の80~90%しかありません。最大出力電力 P_{max} と点線の面積 $V_{oc} \times I_{sc}$ の比(式②)を**曲線因子 (fill factor)**と呼び、 FF で表します。逆に、 V_{oc} 、 I_{sc} 、 FF がわかれば、式③によって**最大出力電力**を計算することができます。

変換効率には小面積の**セル変換効率**、大面積の**モジュール変換効率**があります。一般にモジュール変換効率は、セル変換効率の70~80%しかありません。

図1 太陽電池の電圧-電流特性



太陽電池の電圧-電流特性曲線と負荷曲線との交点に内接する長方形の面積が最大になる負荷のときが最適負荷点で、このときの電力が最大出力電力

$$\text{変換効率 } \eta = \frac{\text{取りだせる最大の電力 } P_{max} [\text{kW}]}{\text{放射強度 } E [\text{kW/m}^2] \times \text{受光面積 } A [\text{m}^2]} \times 100 [\%] \dots\dots \text{式①}$$

$$\text{曲線因子 (FF)} = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \times 100 [\%] \dots\dots \text{式②}$$

$$\text{最大出力電力} = \text{開放電圧 (} V_{oc} \text{)} \times \text{短絡電流 (} I_{sc} \text{)} \times \text{曲線因子 (FF)} \dots\dots \text{式③}$$

要点 Check! ●変換効率は、太陽電池から取りだせる最大電力の、太陽光のパワー(放射強度×受光面積)に対する百分率で表される

013 変換効率を100%にできない理由

現在の太陽電池の変換効率はせいぜい20%です。それでは、研究開発が進めば100%の変換効率を達成できるのでしょうか？ 残念ながら、単独の太陽電池の変換効率が100%になることはありません。なぜならば、**図1**のようにいくつかの損失要因があるからです。

(1) 透過による損失

シリコンの場合、**バンドギャップ**に相当する1.1 μm より長い波長の光は透過してしまうので、太陽光のうち15~25%は電気に変換できません。

(2) 光学要因(反射や散乱)による損失

表面散乱や反射のために、半導体に入らない光は変換できません。

シリコンは、反射防止コーティングをしないと入射光のおよそ40%を反射します(第4章で述べるように、反射防止膜やテクスチャー加工によって改善可能)。

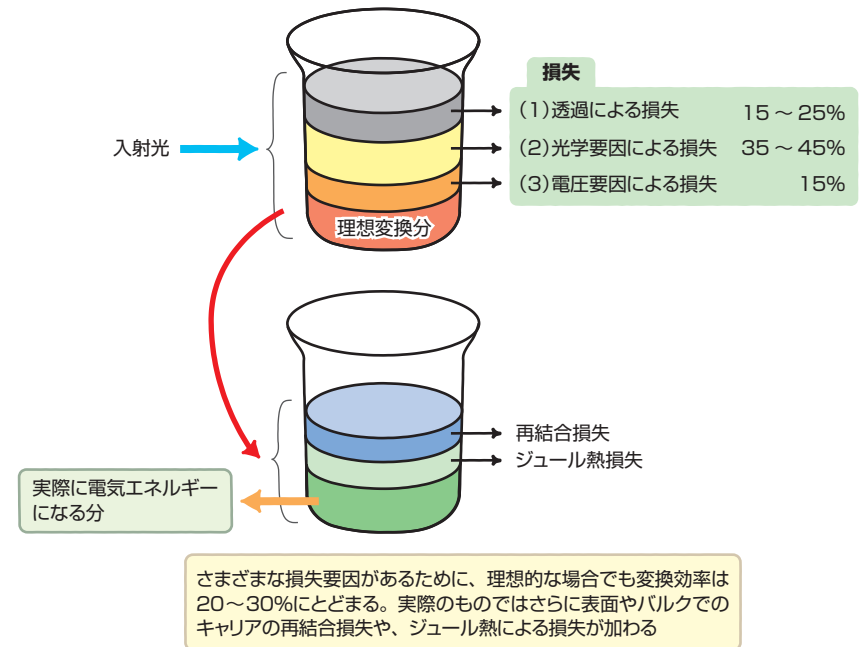
(3) 電圧要因による損失

開放電圧は内蔵電位差を超えられないため、その差が損失になります。

以上の損失を除いたものが**理論最大変換効率**です。この値は、半導体のバンドギャップに依存し、シリコンでは26%、ガリウムヒ素(GaAs)では28%、CIS(CuInSe₂)では23%となっています(理論最大変換効率については第6章を参照)。

実際の太陽電池では、さらに**図1**の下図のように、**再結合損失**、**ジュール熱損失**(半導体バルク内部の電気抵抗による発熱)などの損失要因のため、理想の値には達しません。

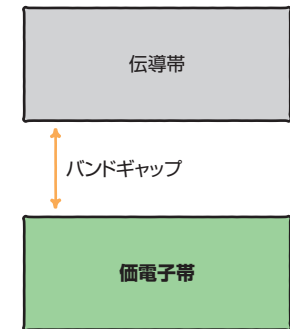
図1 変換効率を下げるさまざまな原因



用語解説

バンドギャップ → 半導体の中の電子がもつことができるエネルギーは、価電子帯、伝導帯と名づけられたエネルギーの帯(バンド)の中にかぎられている。2つのバンドの間のエネルギー範囲をバンドギャップと呼び、電子はこの範囲のエネルギーをもつことができない。純粋の半導体では、極低温では電子が価電子帯のみに存在し、伝導帯は空っぽになっている。温度が高くなると、電子は熱エネルギーによってバンドギャップを飛び越えて、空いた伝導帯に飛び移る確率が生じてくる。バンドおよびバンドギャップのくわしい説明は、第5章の(057)以降を参照してほしい

再結合損失 → 光によってp型領域で生成された電子がp型領域の多数キャリアであるホールと結びついて消滅したり、n領域に生成されたホールが電子と結びついて消滅したりして光起電力をもたらさないことによる損失。表面で起きるものと結晶本体で起きるものがある。詳細は(077)参照



- 入射光のエネルギーは電気に変換される前に種々の理由で失われる
- 電気に変換された後も、再結合や電気抵抗によって損失する

ソーラーパネル(太陽電池モジュール)は多数のセルからできている

図1の(a)は、家の屋根に設置した太陽電池を示しています。これは**太陽電池アレイ**といって、**太陽電池モジュール**を組み合わせてつくったパネルです。太陽電池アレイは、(b)のようにモジュールを直並列に配線して構成されています。(c)に示した太陽電池モジュール(028参照)は、(d)の**太陽電池セル**を図2のように直列に接続してあります。

なぜ、セル→モジュール→アレイという段階を踏むのでしょうか？

それは、セル(ミニ太陽電池)1個では**出力電圧が低い**からです。実際、セルの電圧(開放電圧)は半導体によって決まっていますが、乾電池の電圧より低い1V足らず、**結晶シリコンでは0.8V**しかありません。これを25個直列につないだモジュールで、出力電圧は20Vになります。図2に示す8直列5並列の例では、直列につないだモジュール列(ロッド)の出力電圧は160Vとなり、電灯線の電圧と同レベルになります。また、1辺10cmの正方形のセル(面積100cm²)のセルを流れる電流は、せいぜい4Aです。この値は直列にただけでは増えません。流れる電流を増加させるには、並列につなげばよいのです。たとえば、5つのモジュール列を並列にすれば20Aも流せます。

このように8直列5並列のアレイにすることで、160V、20Aすなわち約3kWの太陽電池発電機になるのです。ただし、太陽電池アレイの出力は直流で、家庭にきている電灯線は交流ですから、このままでは電灯線につないで使うことはできません。あとで述べる**パワーコンディショナー**があって初めて、電力会社の配電線につながることができます。パワーコンディショナーでは、直流を交流に変えるだけでなく、電力系統に接続するために、電圧・周波数・位相の調整を行っています。



- セルの出力電圧は低いので、直列につないで電圧をかせいしている
- モジュールを直並列につないで必要な電力量をかせいしている

図1 太陽電池モジュールと太陽電池アレイ

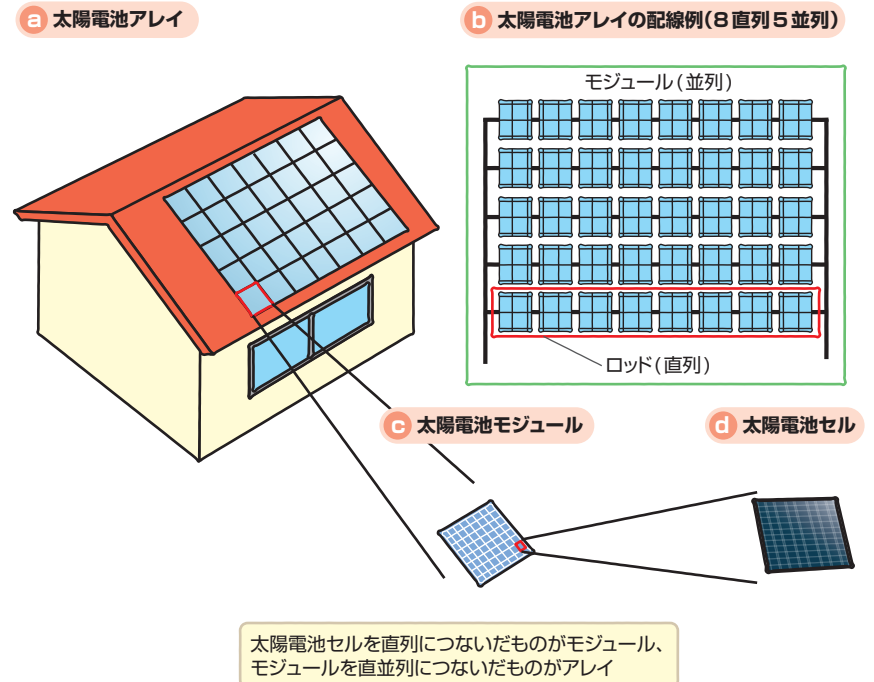
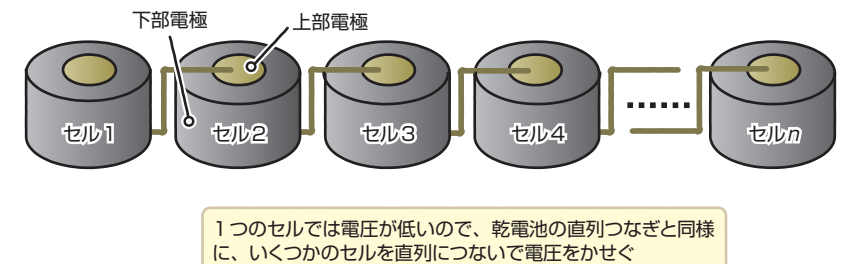


図2 モジュールではセルを直列につないで高い電圧を得る



1枚のソーラーパネル(太陽電池モジュール)で何ワット発電できるのか

ソーラーパネル(太陽電池モジュール)にはさまざまなサイズがあります。製造会社によっても、使う目的によっても異なります。また発電電力は、材料(シリコン、GaAs、CISほか)や形態(単結晶、多結晶、薄膜)によっても異なります。

一例としてS社のカタログによれば、多結晶シリコン高出力タイプ(a:外形1650×994mm)で公称最大出力210W、単結晶シリコン高出力タイプ(b:外形1318×1004mm)で180Wとなっています。

1m²あたりに換算すると、多結晶で128W、単結晶で136Wです。地上1m²の面積に、南中時に真上から降りそそぐ太陽光のパワーは約1kWでしたから、受けた光の13~15%くらいしか電気に変わっていないことがわかります(これが**実効モジュール変換効率**)。シリコン太陽電池の**セル変換効率**は20%くらいあるのですが、低下の原因は、①セルを並べてモジュールにするときにどうしても隙間ができること、②電極の下には光が届かないこと、③モジュール外周にフレームが必要なので実効面積が小さくなってしまふこと、などです。

結晶シリコン基板上に薄膜アモルファスシリコンを形成したハイブリッド型の**HIT太陽電池モジュール**(c:外形1320×895mm)の出力は180Wあり、1m²あたりに直すと152Wもあります。

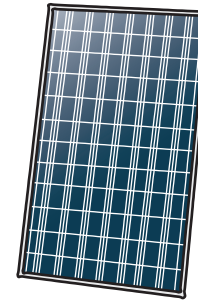
化合物半導体系の太陽電池のモジュールは、より多くの電力を発電します。たとえば、2009年にオーストラリアのレースで優勝した東海大学チームのソーラーカーに搭載されたInGaP/InGaAs/Ge太陽電池(図2)の変換効率は、35%という高い値でした。この電池は宇宙用にも使われますが、コストが高いのが難点です。なお、東海大学チームは2011年のレースでも優勝しましたが、これに搭載されたのは、HIT太陽電池モジュール(変換効率22%)でした。

図1 タイプ別のソーラーパネルの性能

a 多結晶シリコン高出力タイプ

b 単結晶シリコン高出力タイプ

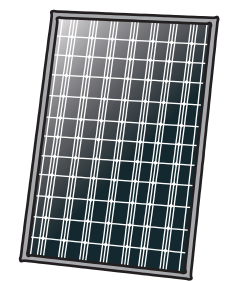
c HITタイプ



外形 1650×994mm
公称最大出力 210W



外形 1318×1004mm
公称最大出力 180W



外形 1320×895mm
公称最大出力 180W

図2 オーストラリアのレースで優勝した東海大チームのソーラーカー



このソーラーカーは化合物半導体系のInGaP/InGaAs/Ge太陽電池を搭載していた

用語解説

単結晶 → 材料全体にわたって配列の方位や繰り返し周期が一定に保たれている結晶

多結晶 → 材料がいくつかのグレーン(結晶粒)に分かれていて、1つひとつの結晶粒は単結晶であるようなもの

アモルファス → 原子や分子の配列が規則的でなく、原子同士の結合の長さや角度にゆらぎがある材料



- 結晶シリコンの太陽電池パネルは、1m²あたり130W程度発電する
- ハイブリッド型シリコン太陽電池パネルは1m²あたり150W発電する

行替え

夏のギラギラした太陽は大好きと 思いきや、太陽電池は暑さが苦手

夏は日照時間が長く、日射強度も大きいので、太陽電池にとって有利だと思われ
ます。確かに7~8月の発電量はほかの月の発電量に比べて若干大きくなっていま
すが、かならずしも必ず抜けて大きくはありません。これはなぜでしょう？ 実は、
太陽電池は暑さが苦手という事情があるからなのです。

図1は、ある夏の晴れた日の筆者の家における、太陽電池モジュールの温度と外
気温の時間変化を示しています。通風を考慮した設置にもかかわらず、外気温の最
高値は33°Cですが、モジュール温度は61°Cにもなっています。

図2は、多結晶シリコン太陽電池の最大出力 P_{max} の温度依存性を示しています。
 P_{max} は1°Cあたり0.66%の割合で低下します。モジュール温度の最高値61°Cと標準
温度25°Cの差は36°Cもあるので、出力は $0.66 \times 36 \approx 23.8\%$ も低下するのです。本
来なら3kWあるはずの出力が、実際には2.3kWしかでないこととなります。

なぜ温度が高くなると、出力が低下するのでしょうか？ これは、太陽電池が半
導体のpn接合ダイオードであることから生じています。太陽電池の動作状態(010
の図3)は、暗状態(010の図2)のダイオードにおいて逆方向の電圧を加えた状態
に相当します。温度が高くなるとダイオードの逆方向電流が増大することによって、
出力電圧が減少することがおもな原因であると考えられています。

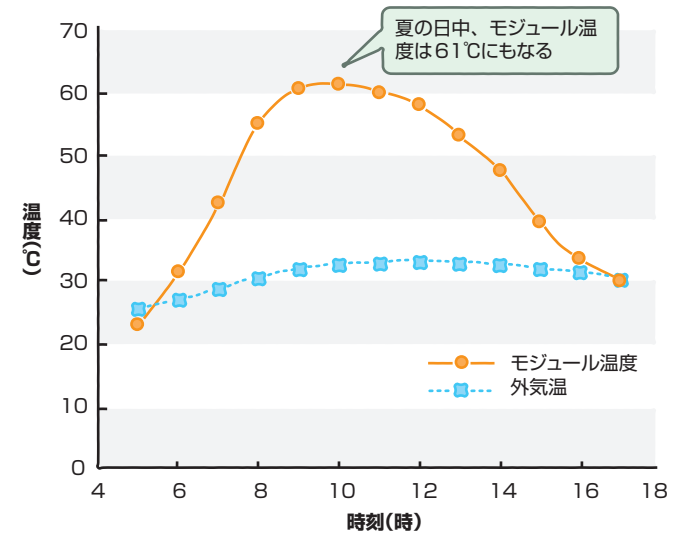
このため、パネルを屋根材から浮かして取りつけるなどで通風を工夫して、温度
上昇をできるかぎり抑えています。なお、HIT太陽電池は表面層のアモルファスシリ
コンのバンドギャップが広いので、温度上昇の影響を受けにくいとされています。

行替え

要点 Check!

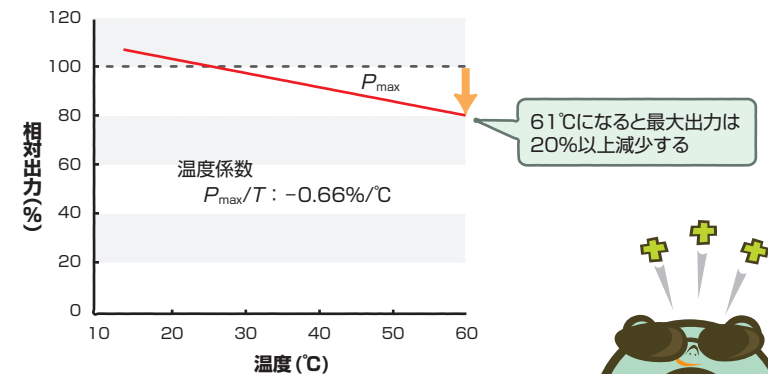
- 夏期には、モジュール温度が高いために20%以上出力がダウンする
- 温度が高くなると接合の逆方向電流が増加し、出力が低下する

図1 モジュール温度と外気温の時間変化



(夏の晴れた日、2005年8月20日の筆者の家にて)

図2 多結晶シリコン太陽電池の温度特性



(参考:『太陽エネルギー工学』浜川圭弘、桑野幸徳 編、培風館、1994年)



017

ソーラーパネルに家電を直結しても動かない理由 直流と交流

乾電池や蓄電池の電気は、プラス極からマイナス極に向けて一方的に流れる性質をもちます。極性が入れ替わることは決してありません。このような電気の流れを**直流**といいます。太陽電池の出力も直流です。直流は図1に示すように、時間とともに符号が変わることはありません。

電力会社の配電線(電灯線)からくる電気は**交流**です。交流は、時間とともにプラス、マイナスが交互に繰り返すような電流のことです。交流は、図2のように時間とともに電流が正弦波の形をしてプラスにもマイナスにも変化します。1秒間に符号が変わる頻度を**周波数**といいます。配電線の周波数は、東日本では50Hz、西日本では60Hzです。

太陽電池の直流電力を電灯線につないで使うには、交流に直す必要があります。また、電灯線にきている交流電圧と、交流の山の高さ(振幅)と周波数(波の繰り返し)、および位相(波の変化のタイミング)をそろえてやる必要があります。これがパワーコンディショナーの役割です(図3)。これには直流を交流に変換する**インバータ**というしかけが入っています。

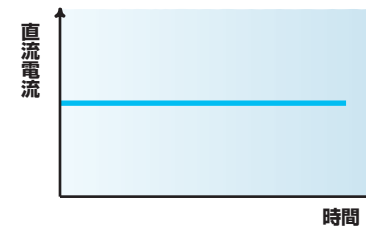
最近では、電源に直流が使われる家電製品もできました。そこで、わざわざ直流を交流に変えずに、直流のまま送電する**直流送電**も検討されており、実証実験が行われています。

また、電線の電気抵抗がゼロの高温超伝導ケーブルによる直流送電の実証実験が行われており、送電損失は交流の超伝導送電の1/10になるそうです(参考:『SEI WORLD』2010年4月号 vol.391)。



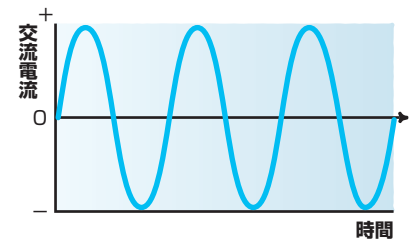
- 太陽電池の出力は乾電池と同様の直流
- 直流を交流につなぐには、パワーコンディショナーが必要

図1 直流の電流は時間とともに符号が変わらない



直流の電池のプラスとマイナスが入れ替わることはない

図2 交流の電流は時間とともに符号が変化する

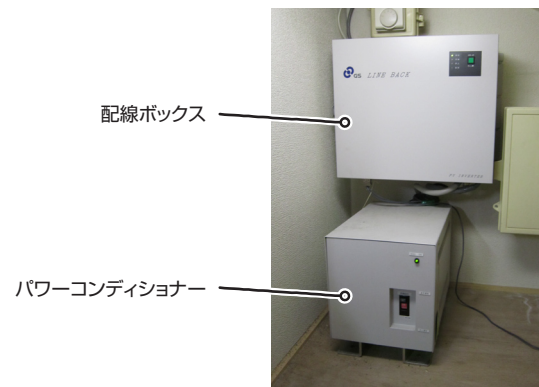


交流って、電流が波のように大きくなったり小さくなったり、流れる方向も1秒間に何十回も入れ替わるのですね



電灯線の交流電流の大きさと符号は、グラフのように時間変化する

図3 屋根裏などに納められるパワーコンディショナー



パワーコンディショナーは小さいので、屋根裏の小部屋に収まる

COLUMN

送電線に交流が使われる理由

同じ電力を送るのに、高い電圧にしておくで少ない電流ですみます。電流が少ないと送電線での電力ロスが少ないので(送電線の電気抵抗を R 、電流を I とすると、電力ロスは I^2R)、長距離の送電が可能になるのです。たとえば、首都圏から200kmも離れた柏崎刈羽原子力発電所から電力を運んでくる送電線は、100万ボルト(1000kV)という高い電圧で送電されています。

交流であれば変圧器(トランス)というシンプルなしかけを使って、簡単に電圧を上げ下げすることができます。家庭の近くでも、6600Vの高圧線からトランスで200V、100Vに降圧して家庭に配電しています。

以前は、直流電圧の上げ下げにトランスが使えないので、直流配電は簡単ではありませんでした。それで、配電線には交流が使われたのです。いまではパワーエレクトロニクスが進歩して、直流電圧も自由に上げ下げできるようになり、直流配電も検討されています。

柱上変圧器

