

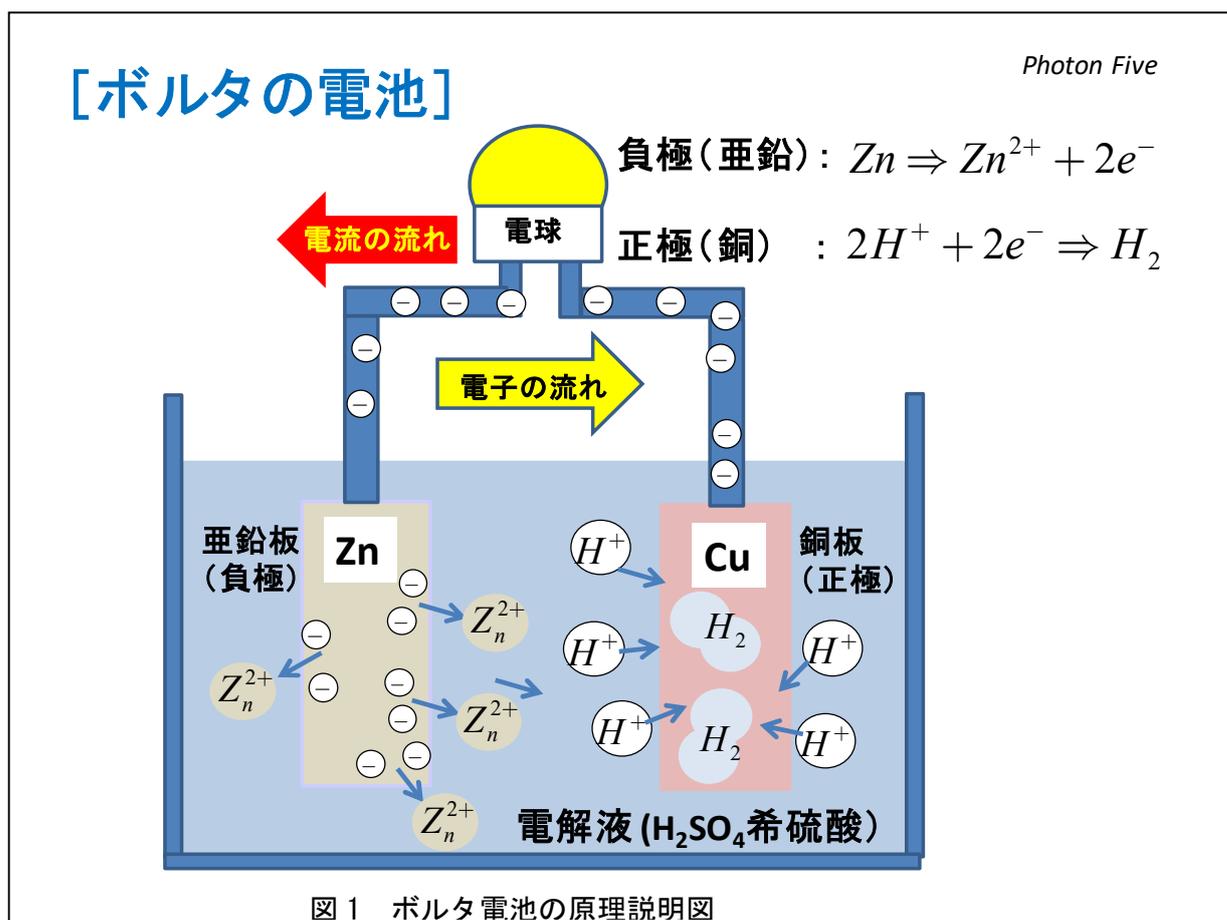
色素増感太陽電池の解説 (第3版)

ここでは、色素増感太陽電池の原理だけではなく、ボルタ電池、シリコン太陽電池の原理など、周辺知識についても説明しています。

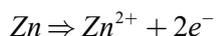
1. 電池の原理

1-1 ボルタの電池

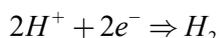
図1に示すように、希硫酸の電解液に亜鉛板と銅版を浸します。電解液には水素イオンが含まれていますが、亜鉛(Zn)の方がイオンになり易いため、亜鉛板に電子を残し、 Zn^{2+} 陽イオンとなって電解液に溶けだします。電子は導線を伝わって銅版に流れます。導線の途中に電球が接続されていれば、この電子の流れによって電球を点灯させます。電子の流れと逆方向を電流の流れの方向と言います。すなわち、電流が銅板から亜鉛板に流れることになるので、銅板が正極、亜鉛板が負極となります。電子の流れを生じさせる力を起電力と言います。単位はボルト[V]で表します。ボルタ電池の起電力はおよそ0.8[V]程度です。銅



板に流れ込んだ電子は銅板の周囲の水素イオン H^+ と反応して水素ガス H_2 となります。負極（亜鉛板）での反応は、



で表され、正極（銅板）での反応は、

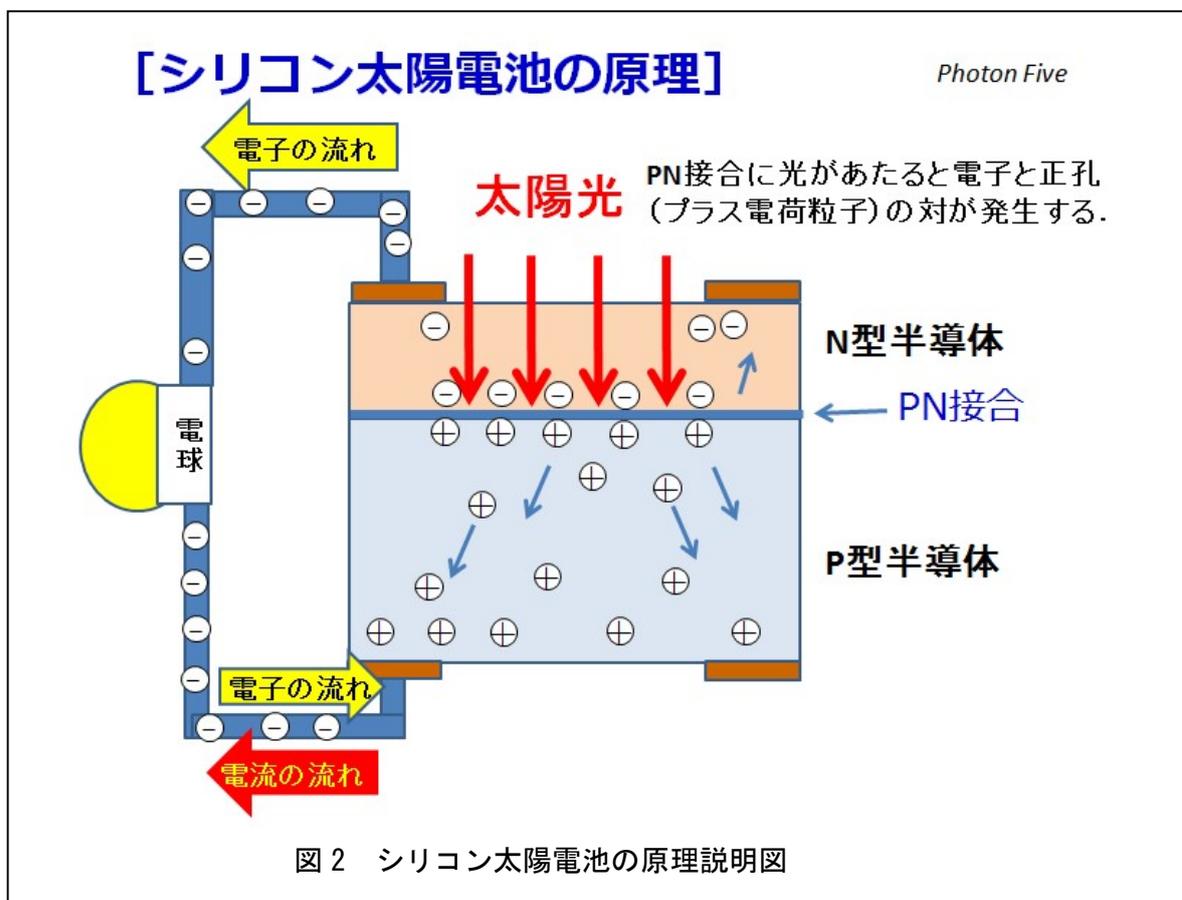


で表されます。

ボルタ電池は世界最初の化学電池とされています。ボルタの電池により、人類ははじめて、連続して導体に電流を流すことができるようになり、アンペールの電流と磁気の関係やファラデーの電磁誘導の法則などモーターや発電機の原理の発見につながっていきました。（それまでは、人類は静電気、瞬間電流しか知りませんでした。）

1-2. シリコン太陽電池

図2に、世の中で広く用いられているシリコン太陽電池の原理図を示します。シリコン単結晶に電子が多くなる不純物を加えた部分をN型半導体と言い、正孔（プラス電荷粒子）が多く発生しやすい不純物を加えた部分をP型半導体と言い、両者の境界面を接合面と言います。この接合面は形成されると同時にある電圧を持ちます。その大きさは用いる半導体材料や不純物濃度などで決まりますが、シリコン太陽電池の場合およそ0.8V前後です。この電圧を乗り越えるエネルギーに相当する波長の光



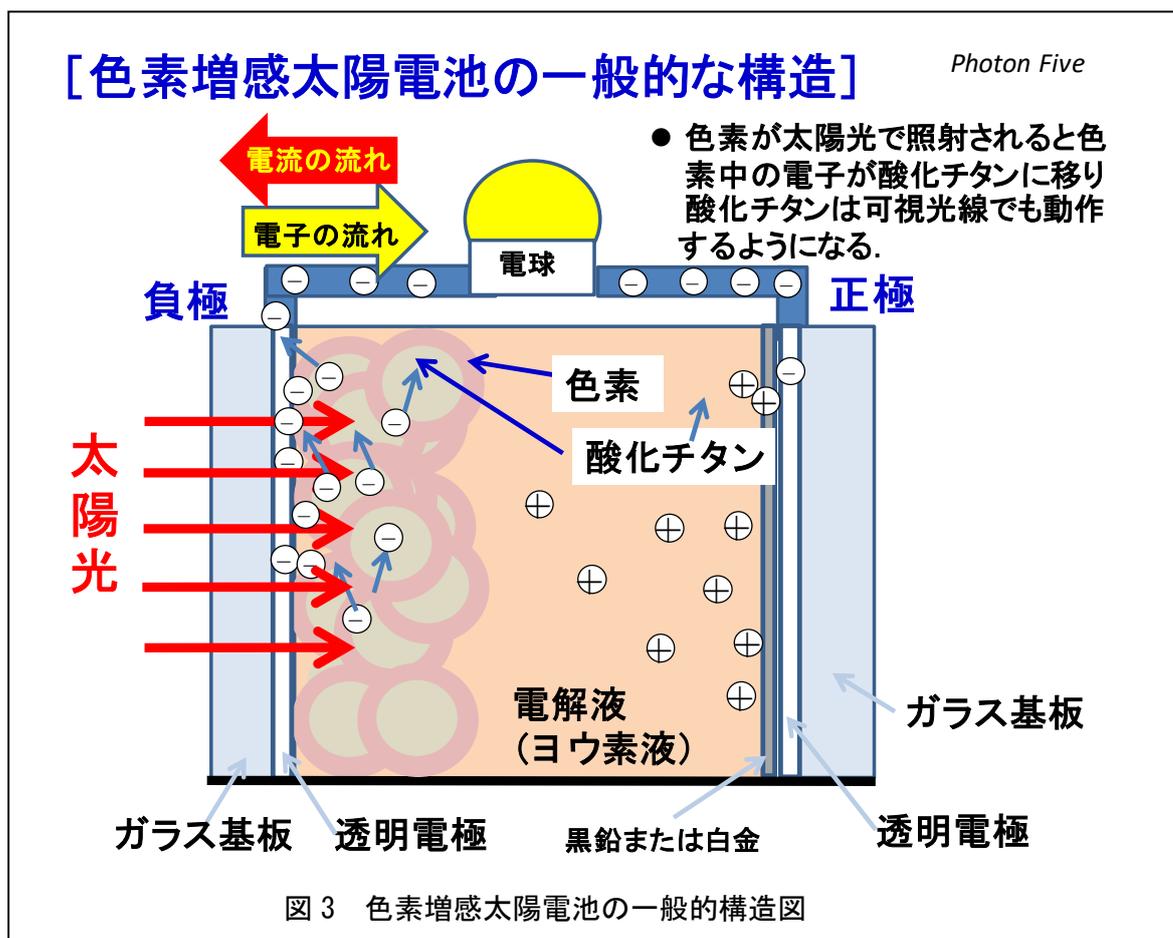
が接合面に入射すると電子と正孔（プラス電荷粒子）の対（ペア）が発生します（光のエネルギーは波長が短くなるほど大きくなります）。光を一つの粒と考えると、ある大きさのエネルギーを持つ一つの光の粒が接合面に入射すると一対の電子と正孔（プラス電荷粒子）の粒をはじきだすのです。N型、P型各々の半導体に電極をつけ、両者を導線でつなぐとN型からP型半導体に向かって電子の流れができます（電流の向きで言うとP型からN型に電流が流れます）。導線の途中に電球をつなげば、電球が点灯します。

なお、シリコン太陽電池作成には純度の高いシリコン単結晶や細かい単結晶の集合体である多結晶が必要で、高度な電子技術や材料科学によって製造されています。

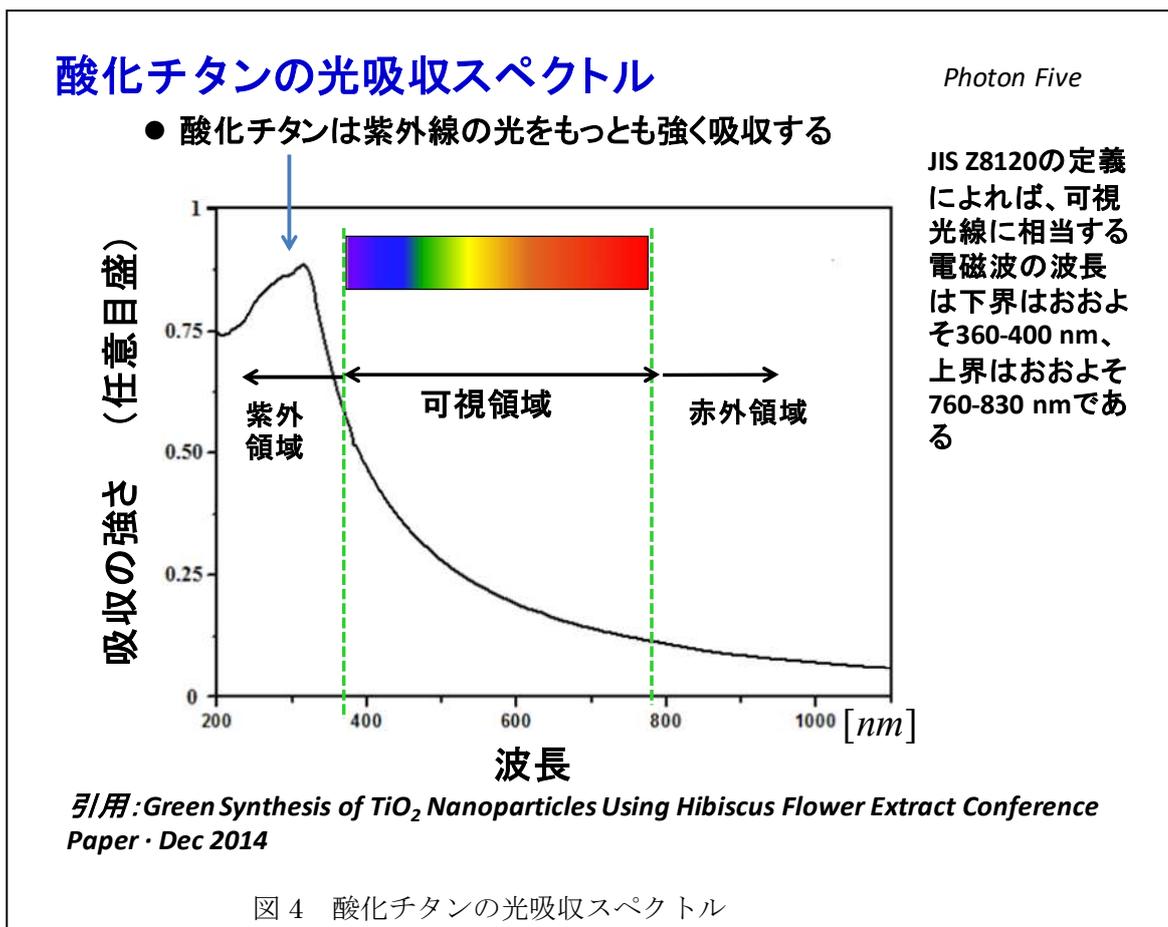
2. 色素増感太陽電池

【負極の構成】

・色素増感太陽電池の一般的構造を図3に示します。透明な導電材料であるスズ(Sn)やインジウム(In)の酸化物の薄膜が成膜されたガラス基板、これをITO(Indium Tin Oxide)基板といますが、この上に酸化チタン(TiO₂)ペーストを塗布し高温で焼結したものを負極といいます。



- ・酸化チタンそのものも半導体で光の照射により電子を放出する能力があり、太陽電池の負極となり得ます。
- ・しかし、図4でわかるように、酸化チタンが最も多く吸収する光の波長は紫外線領域にあります。
- ・さらにその次の図5は太陽光が放出するエネルギーの内、どのような波長の光が地表に届くのかを示したグラフです。可視光線と赤外線領域が主で、紫外線は、地表に届く太陽光エネルギー全体のわずか3%程度とされています。



- ・このように酸化チタンが主に吸収できる光の波長と地表に届く太陽光の主な波長とは合わないのです。
- ・一方、多くの色素の吸収波長は可視光線の領域にあるのです。例えば、ハイビスカスの花の色素は、図6に示すように主な吸収波長は可視光線の領域にあり、太陽光をよく吸収します。
- ・そこで酸化チタンが焼結された負極をハイビスカスなど可視光線をよく吸収する色素で染色します。
- ・図3に戻って考えます。色素が太陽光で照射されると、色素は電子を放出します。酸化チタンは色素を吸着しているため容易に色素から電子を受け取り、透明電極→導線の経路で正極に到達します。

太陽光の放射強度の波長分布

Photon Five

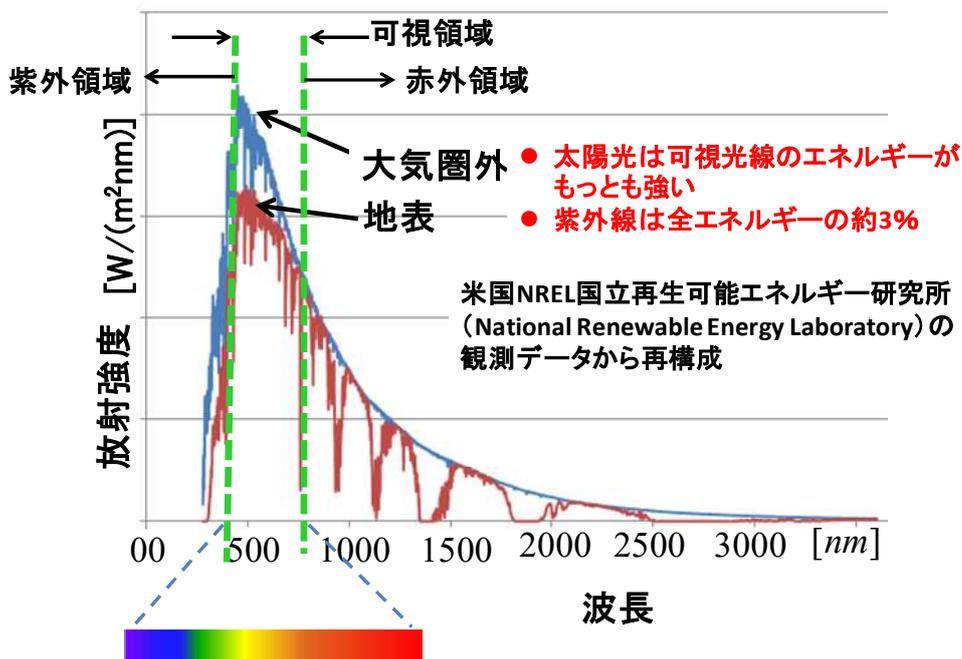
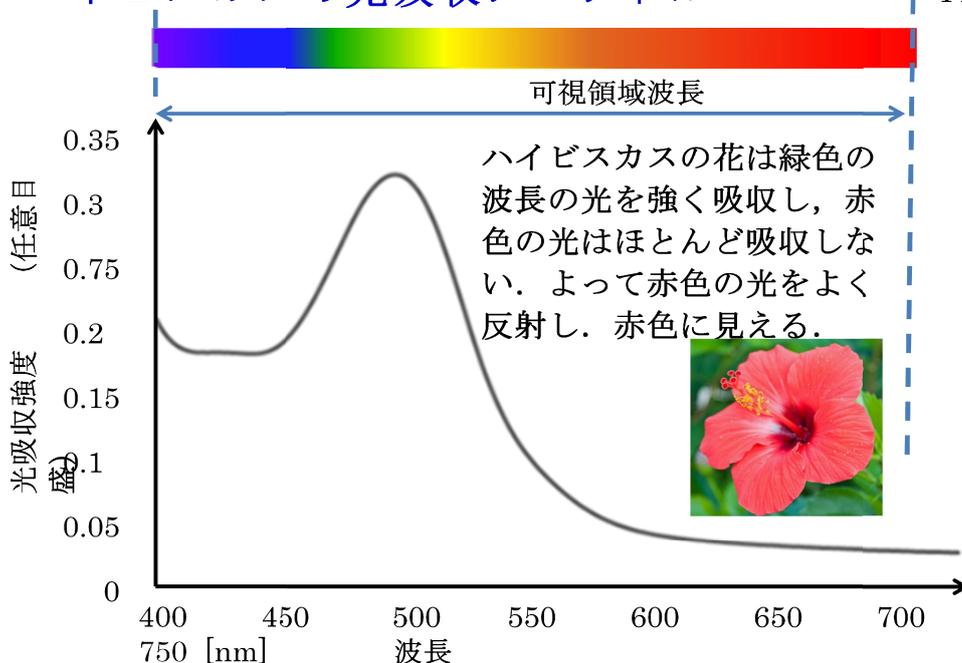


図5 太陽光の放射強度の波長分布 (パワースペクトル)

ハイビスカスの光吸収スペクトル

Photon Five



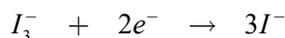
R.F.Mansa, G.Govindasamy, Y. Y. Farm, H.Bakar, J.Dayou and C.S.Sipaut; "Hibiscus Flower Extract as a Natural Dye Sensitiser for a Dye-sensitised Solar Cell", *Journal of Physical Science*, Vol. 25(2), 85-96, 2014から引用

図6 ハイビスカスの光吸収スペクトル

- ・一方、電子を失って陽イオンになった色素は電解液中のヨウ素負イオンから電子を受け取り、色素はもとの状態に戻ります。化学式であらわすと、

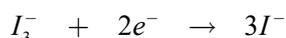


となり、電解液中のヨウ素負イオンは三ヨウ化物負イオン (I_3^-) に変わります。三ヨウ化物 (I_3^-) 負イオンは、負極から導線を経て正極に供給された電子によって上式とは逆反応



によって $3I^-$ となり、電解液は色素に電子を与える能力を回復します。

- ・この過程が繰り返し生じることにより色素増感太陽電池となるのです。
- ・なお、正極に固定されている黒鉛は、



の反応を促進する役割を果たしています。

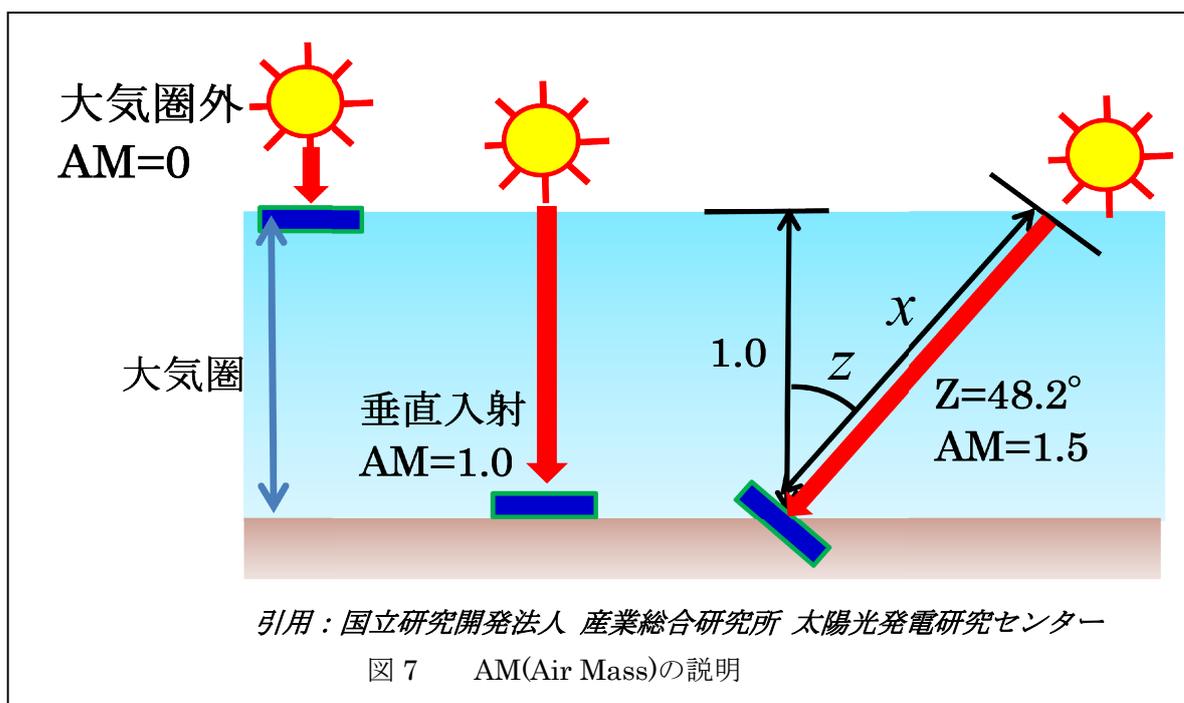
高度な色素増感太陽電池を目指して研究している人たちは、例えば、色素にはルテニウム錯体、正極黒鉛の替りに白金薄膜、電解液はヨウ素液ではなく、もっと複雑な化合物などを用いています。

以上、透明電極を持つ一般的構造の色素増感太陽電池について説明しました。透明電極は一般人には入手が困難で、透明電極の基板であるガラス板の切断作業、縁の面取り作業などが必要で、高価となります。フotonファイブが提供する実験キットでは、透明電極の代わりにステンレスメッシュ上に酸化亜鉛ペーストを焼結した負極、ステンレスメッシュ上に黒鉛を固着した正極を発案（実用新案登録第3215339号）することにより、多数の実験が低価格で行うことを可能にしています。

*本キットの色素増感太陽電池は、理科教育実験キットであり、太陽電池としての発電効率よりも、安全性を重視、優先した構成にしています。

[補足説明 STC, AM1.5, ソーラーシミュレータ]

太陽光発電システムの性能を比較する測定基準としてSTCがあります。STCとは基準試験条件(Standard Test Condition; STC)の略号で、日本では、JISにより、「AM1.5、1000W/平方メートル、電池温度 25℃」と規定されています。ここでAM (Air Mass エアマス) とは、太陽光が大気圏外から地表に到達するまでに通過する大気の色を表す言葉で、通過する大気の色が多いほど、太陽光は、大気中のオゾンや水蒸気などで吸収や散乱を受け、地表到達時には減衰しています。図7に示すように大気圏外の値を



0とし、太陽光が地表面に垂直に差し込むとき(入射角 $=0^\circ$)の地表面での値をAM1.0とします。AM1.5とは、入射角 $z=48.2^\circ$ で地表に到達する太陽光に対する値です。図7および三角関数の知識より、

$$\frac{1}{x} = \cos z$$

が成り立ち、これを変形すると、

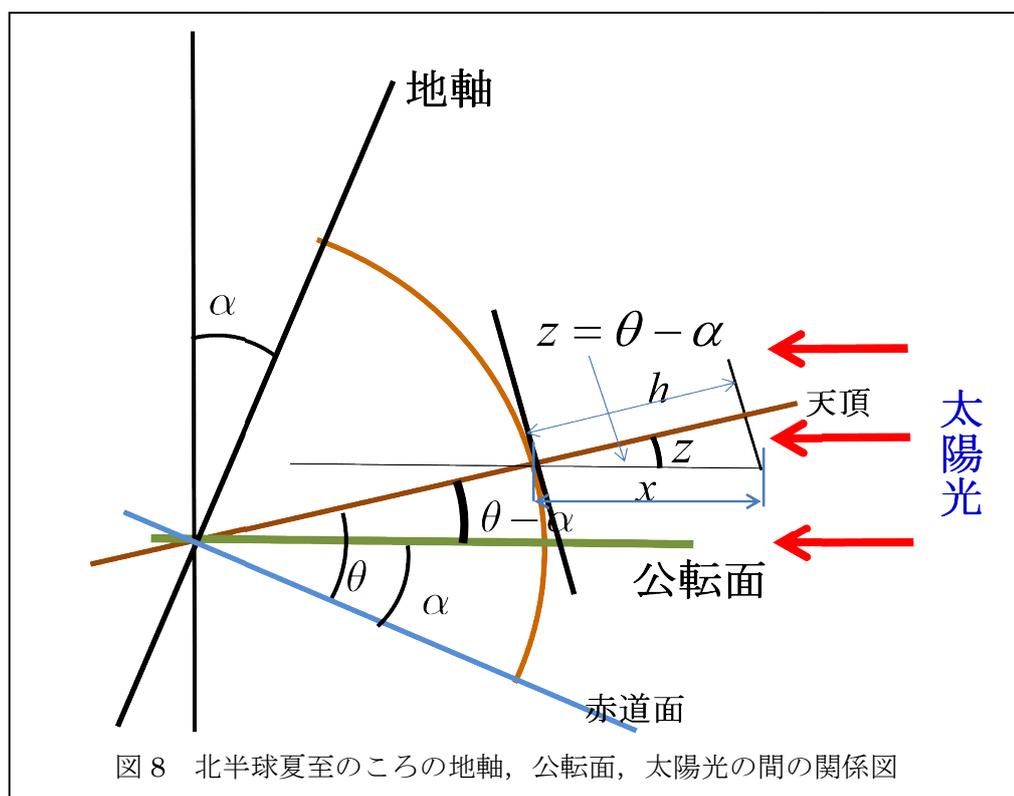
$$x = \frac{1}{\cos z} = \frac{1}{\cos 48.2^\circ} = \frac{1}{0.666} = 1.5$$

となり、AM1.5が得られます。

本文図5グラフでは、大気圏外における太陽光の強さの波長分布(これをパワースペクトルと言います)を青色グラフで示しています。これが地表では、赤色で示したグラフのような波長分布になります。JISによるSTCでは、AM1.5に相当する波長分布を持ち、かつ1平方メートルあたり1000Wの光強度を持つ光源で、25℃の温度で太陽電池の性能を調べることとなります。このような光源装置をソーラーシミュレータと言います。

(例題 1) 近畿地方の夏至のころの南中時の AM はいくら？

それでは、近畿地方の夏至のころの南中時の AM 値はいくらになるか計算してみましょう。図 8 は夏至のころの地球と太陽光線との関係を示した図です。地軸の傾き $\alpha = 23.4^\circ$ 、近畿地方の緯度 $\theta = 35^\circ$ とすると、天頂に対する太陽光の入射角 $z = \theta - \alpha = 11.6^\circ$ となるので、



$$\frac{h}{x} = \cos(\theta - \alpha), \text{ 変形して } x = \frac{h}{\cos(\theta - \alpha)} \text{ となるので, } h \equiv 1 \text{ と置くと,}$$

$$x = \frac{1}{\cos(35^\circ - 23.4^\circ)} = \frac{1}{\cos(11.6^\circ)} = 1.02$$

が得られます。すなわち、近畿地方の夏至のころの南中時の AM 値は 1.02 となります。

(例題 2) 近畿地方の冬至のころの南中時の AM はいくら？

つぎに近畿地方の冬至のころの南中時の AM 値を求めてみましょう。図 9 を参考にすると、冬至のころは、天頂に対する太陽光の入射角 z は、夏至の場合とは異なり、 $z = \theta + \alpha = 58.4^\circ$ となるので、

$$\frac{h}{x} = \cos(\alpha + \theta), \text{ 変形して, } h \equiv 1 \text{ と置くと,}$$

$$x = \frac{1}{\cos(\alpha + \theta)} = \frac{1}{\cos(23.4^\circ + 35^\circ)} = \frac{1}{\cos(58.4^\circ)} = 1.91$$

