

専門科目：自然と環境 科目コード2425700 先端科学技術の政策と事例

第5,6回：「光と色の科学技術」

講師：佐藤勝昭

科学技術振興機構(JST)

研究広報主監

東京農工大学名誉教授

はじめに

- 照明・ディスプレイ・光ディスク・太陽電池・光通信など暮らしの中には「光と色」の科学技術が根付いています。
- この講義では、はじめに、「光の発生」からスタートし、ついで、ヒトが色を感じる仕組みにもとづき光および色の三原色について学びます。
- 残りの時間で、光通信、光ディスク、LED、液晶ディスプレイ、太陽電池など、身の回りのさまざまな光デバイスの原理と仕組みについて学びます。

暮らしのなかの光と色








光の発生

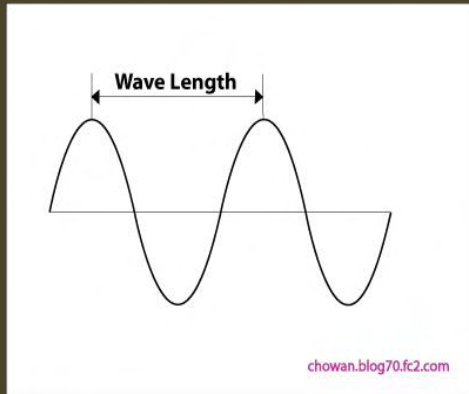
1) 熱して光を出す

- ものを燃やすと明るくなります。
- ガスバーナーにたくさん空気を送り込むと赤かった炎が次第に青くなります。
- 温度の高い物体が光を出すことは「黒体放射」として知られます。
- その分光放射強度はプランクの法則で表されます。

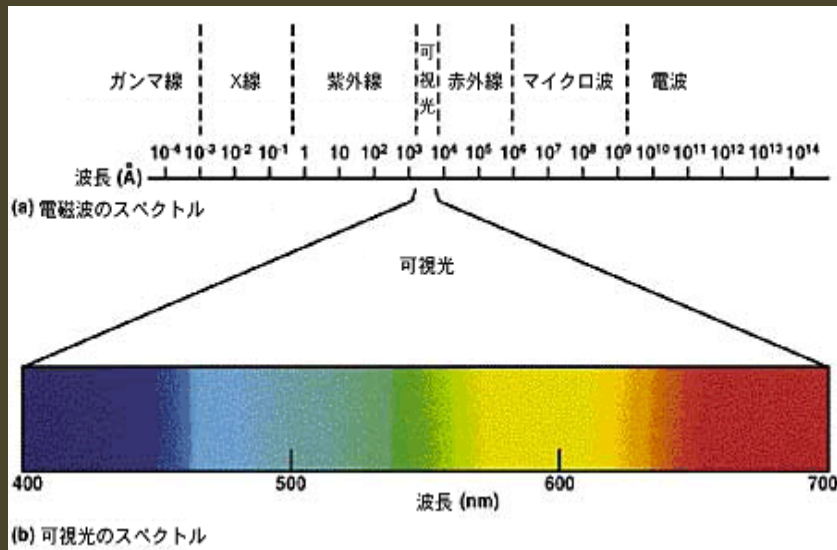
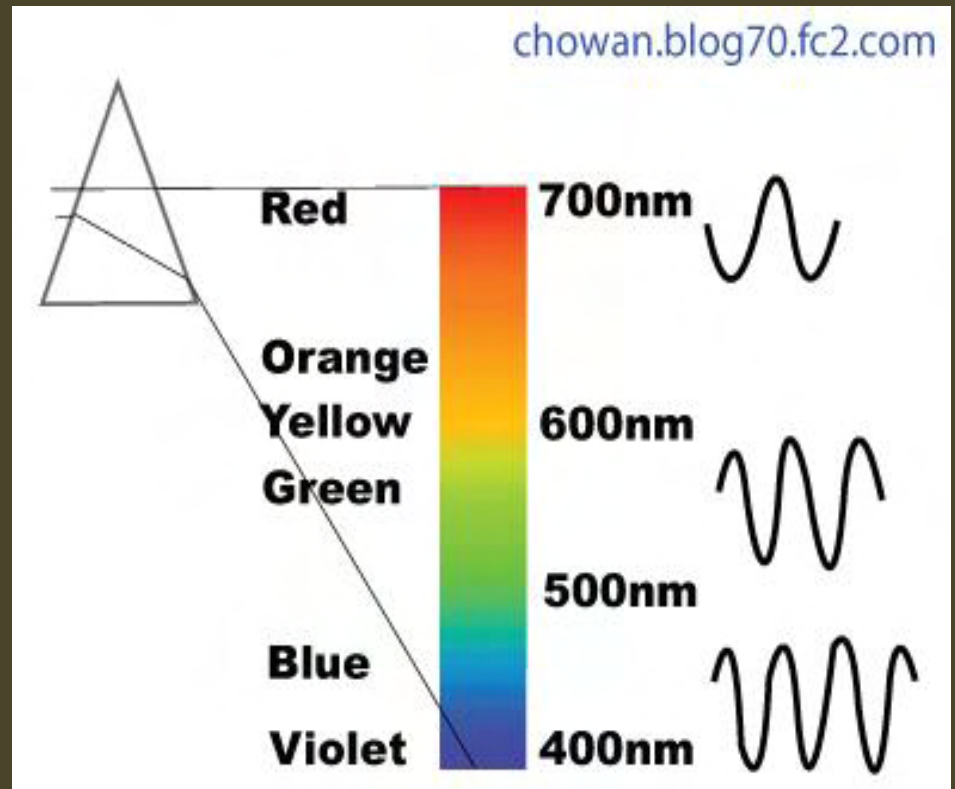
炎の色

1	ガス > エア	
2	ガス > エア	
3	ガス = エア	
4	ガス < エア	
5	ガス < エア	

光の波長と色

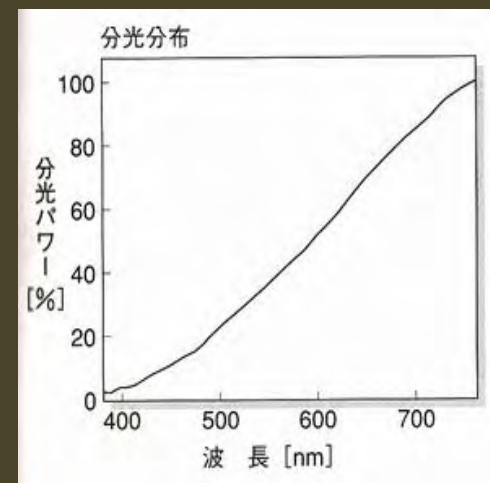
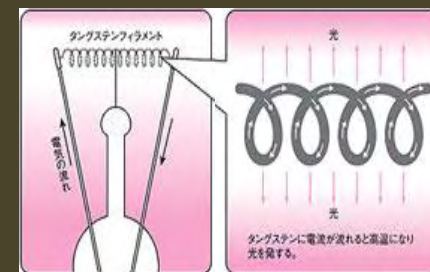
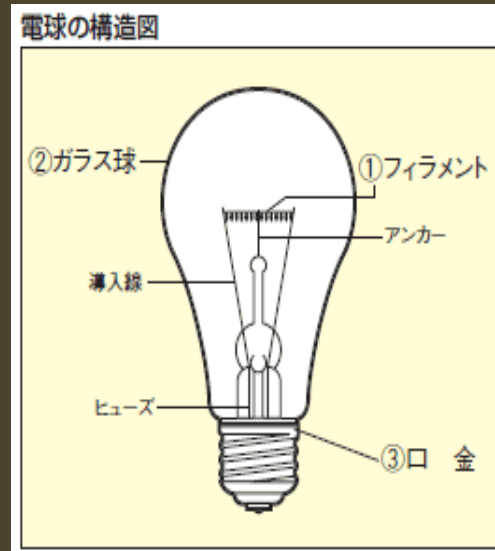


chowan.blog70.fc2.com



白熱電球

- 電球の中には導入線によって、フィラメントが固定されています。
- フィラメントは高温に強いタングステンという金属で作られ、電流を流すと電気抵抗により2000~3000°Cの高温になり、白熱化してプランクの法則に従って、暖かみのある白色光を発します。
- ガラス球の中は真空のものや不活性ガスを封入したものがあり、高温になるフィラメントの燃焼(酸化)や蒸発を防いでいます。



http://www.akaricenter.com/main/hakunetsu_denkyu.htm

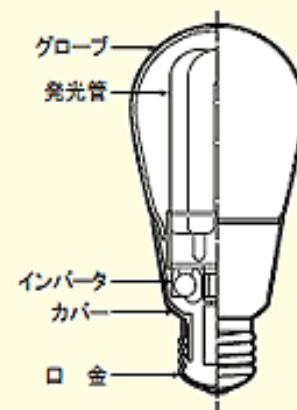
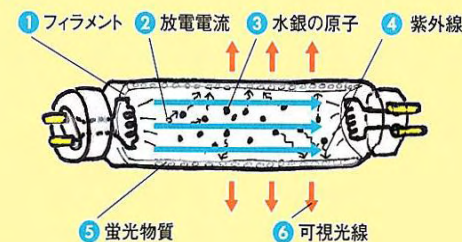
光の発生

2) 蛍光物質から光を出す

- 白い蛍光物質にブラックライトを使って紫外線を当てると、可視光線が出ます。このような現象を蛍光と呼びます。
- 蛍光灯の中では、放電により水銀から紫外線を発生させ、蛍光物質が紫外線を受けて発光します。
- 電球型蛍光灯は、コンパクトに屈曲した発光管と点灯回路を一体化し、電球と同じ口金をつけた蛍光ランプです。

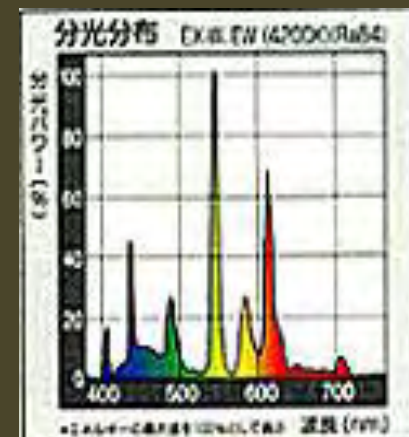
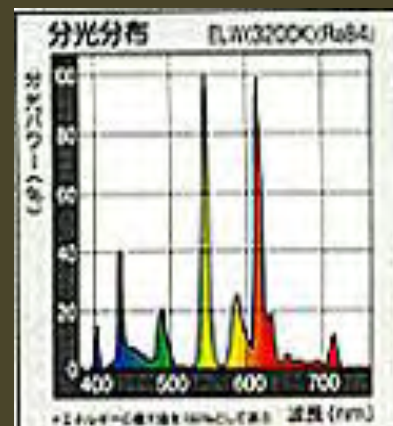


図 蛍光灯の発光のしくみ



蛍光灯の光の色

- 蛍光灯は蛍光物質が光を出しています。
- スペクトルは線状ですが赤・黄・緑・青の光が出ているので目には白く見えます。
- 赤の発光線を強くすると温かい色になります。



光の発生

3)半導体に電流を流して光を出す

- LEDとはlight emitting diode(光を発するダイオード)の略です。
- ダイオードとは、一方方向にのみ電気が流れる半導体のしかけです。

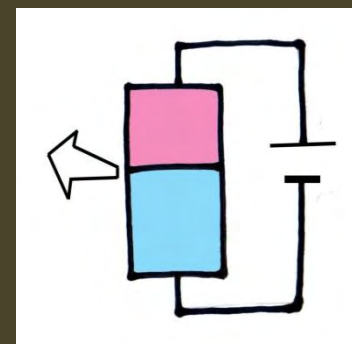
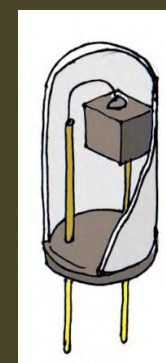


図2 半導体のダイオードの外観と電流-電圧特性

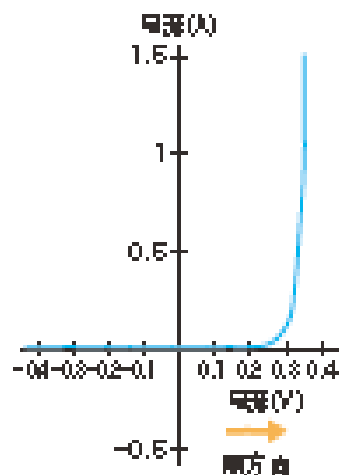
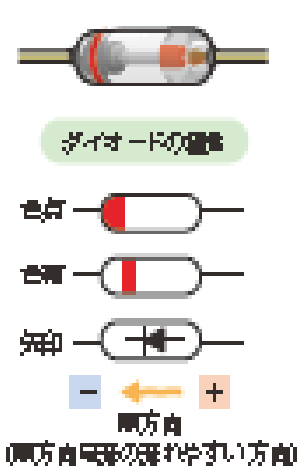


図3 ダイオードの光増幅器を利用したデバイス是非常に多い



白色LEDの仕組み

1. 青色LEDにより、黄色蛍光体を光らせる

3方式のなかで一番発光効率が高い方式です。

LEDの青色光と、その光で励起される補色の黄色を発光する蛍光体の組み合わせで白色を作り出しています。赤色領域の不足を指摘されていますが、不足しがちな赤色や青緑成分を補った改良型も近年開発されています。

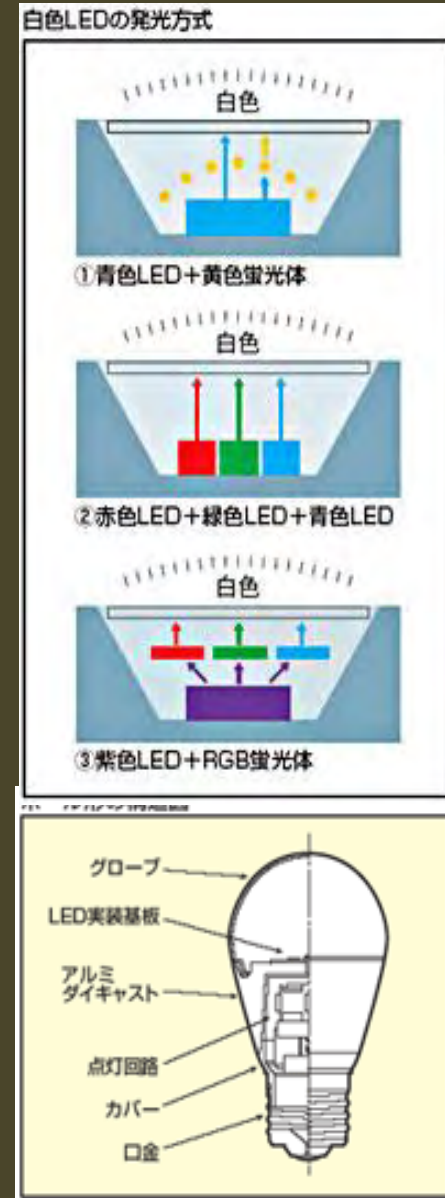
2. 光の3原色のLED(赤色・緑色・青色)を組み合わせる

見た目には白色光が得られますが、放射エネルギーのない波長域があるために、物の見え方が不自然になることもあります。

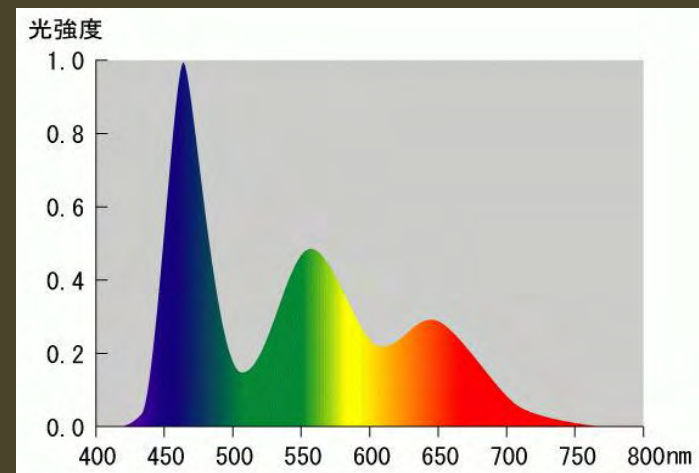
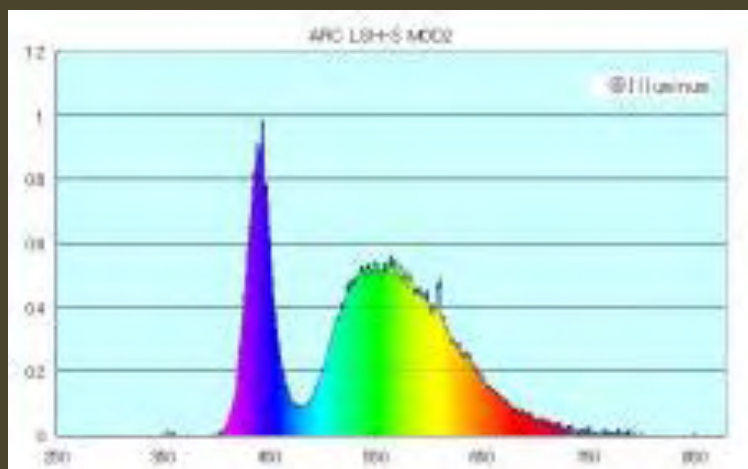
一般的には品物を照らす照明ではなく、光を直接見せるディスプレイや、大型映像装置などに使われます。

3. 近紫外または紫色LEDにより、赤色・緑色・青色の蛍光体を光らせる。

3波長形蛍光ランプと同じ発光形式で、青色よりも波長の短いLED光源で、赤・緑・青の蛍光体を励起させます。きれいな白色が得られる特長がある反面、発光効率の向上が課題です。



白色LEDのスペクトル



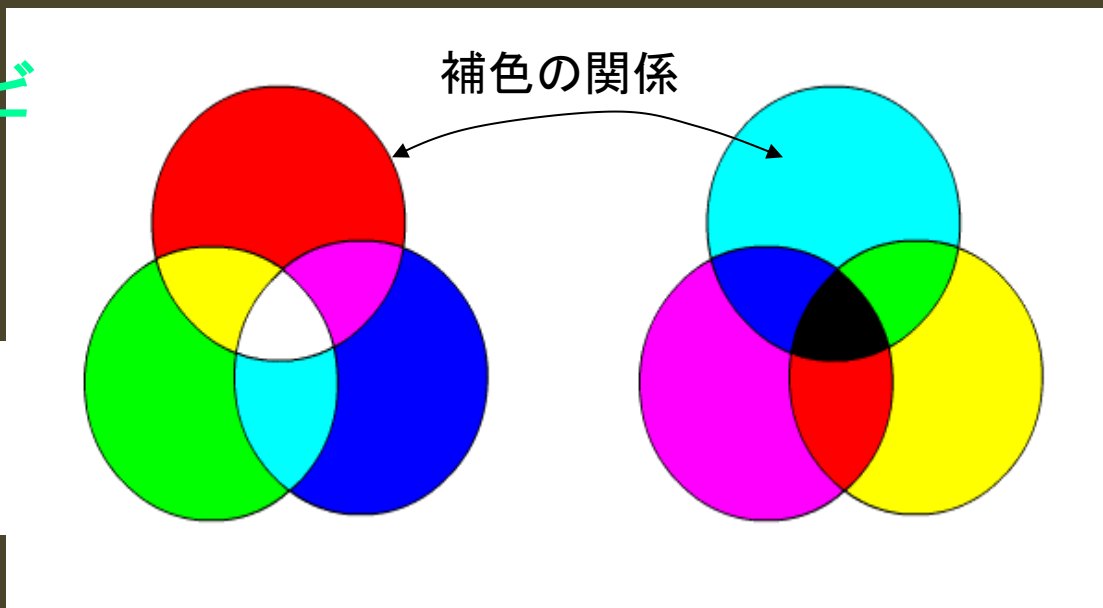
人が色を感じる仕組み

- 色のことを論じる前に、人間が色を感じる仕組みについて述べておきます。カラーテレビでは、全ての色を赤(R)、緑(G)、青(B)の光の3原色で表しています。なぜ色を3原色で表せるのでしょうか。
- 網膜には桿体と呼ばれる光を感じる細胞と錐体と呼ばれる色を感じる細胞があり、錐体にはR,G,Bを感じる3種類のものがあります。これらの三種の錐体の送り出す信号の強さの違いによりさまざまな色を感じることができるのです。

三原色

- 光の3原色（加法混色）
- 各色の強さを変えて混ぜ合わせると、いろいろな色の光になる。赤い光，緑の光，青い光を同じ強さで混ぜ合わせると，白い光になる。
- 色の3原色（減法混色）
- 各色を混ぜ合わせると，いろいろな色ができる。マゼンタ・シアン・イエローを同じ割合で混ぜると黒になる。

カラーテレビ



赤、R(red)
緑、G(green)
青、B(blue)

カラーフィルム
カラーフィルタ
プリンタ

マゼンタ, M(magenta)
シアン, C(cyan)
イエロー, Y(yellow)

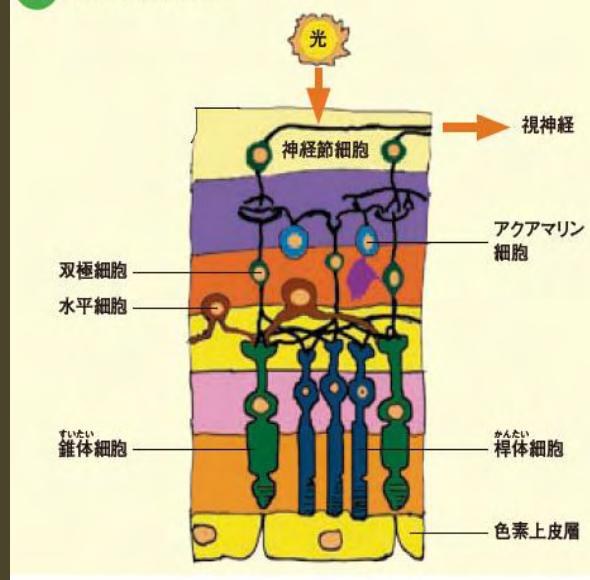
色を感じる細胞

色を感じる

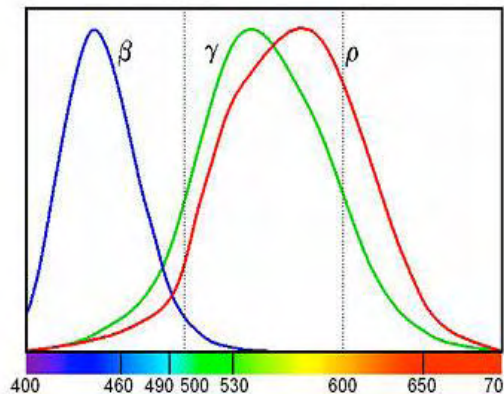


光を感じる

図1 網膜の細胞構成



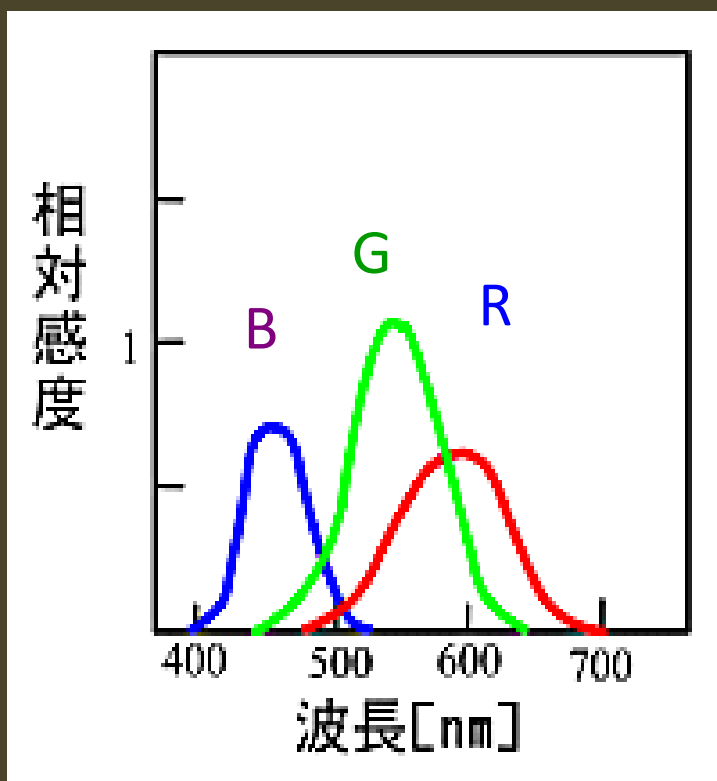
なぜ3原色で表せるのでしょうか。それは人間の色を感じる細胞が3種類あるからです。これらの細胞は錐体(すいたい)と呼ばれ、三種の錐体の送り出す信号の強さの違いによりさまざまな色を感じることができます。



3桿体は、ギリシャ文字のベータ(β)、ガンマ(γ)、ロー(ρ)で表されるような相対感度のスペクトルをもっています。これらはほぼ青B、緑G、赤Rの感度曲線に対応します

色の数値化(1): RGB感度曲線

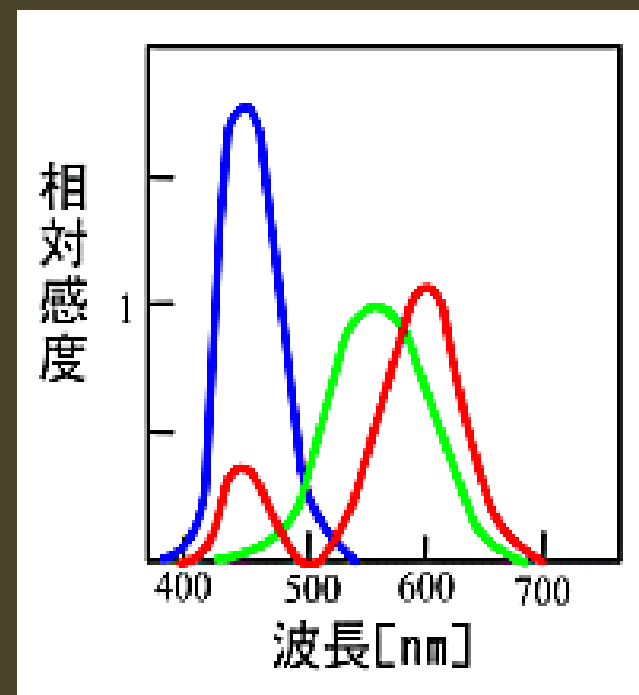
- RGBを感じる細胞の3色の感度曲線をRGB感度曲線といいます。



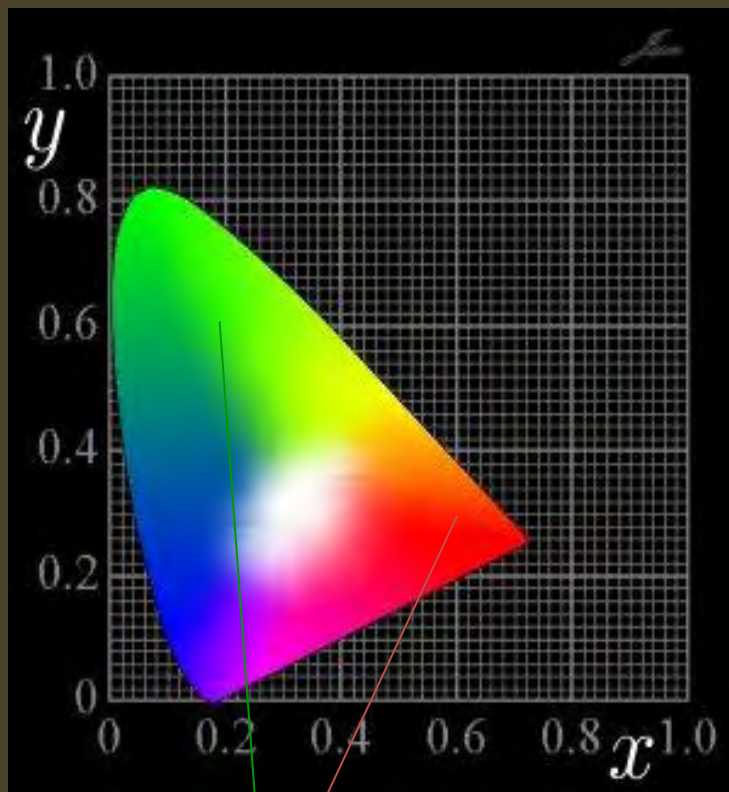
- RGB感度曲線は、特徴的な波長(R,G,B)で一つのピークをもつ曲線になります。
- 人間の眼では、主に感度領域の中央(緑色の光)で明るさを捉え、感度領域の両端(青や赤)で色合いを決めているのです。

色の数値化(2): XYZ等色曲線

- 実際には感覚的な3原色RGBだけでは表せない色もあるので、機械による測色、表色、目の波長感度特性を詳しく調べて数値化した“表色上の3原色”である3刺激値XYZを使います。
 - XYZ等色曲線は3つの刺激値X,Y,Zを使って表す表色系で、これだとXは赤・青2つのピークをもち、Zは青の領域にピークをもつため、XとZを使って紫を表現できます。この等色関数は1931年CIE(国際照明委員会)で定められ、現在にいたるまで使われています。すべての色はXYZの3刺激値で与えられます。



CIE色度図

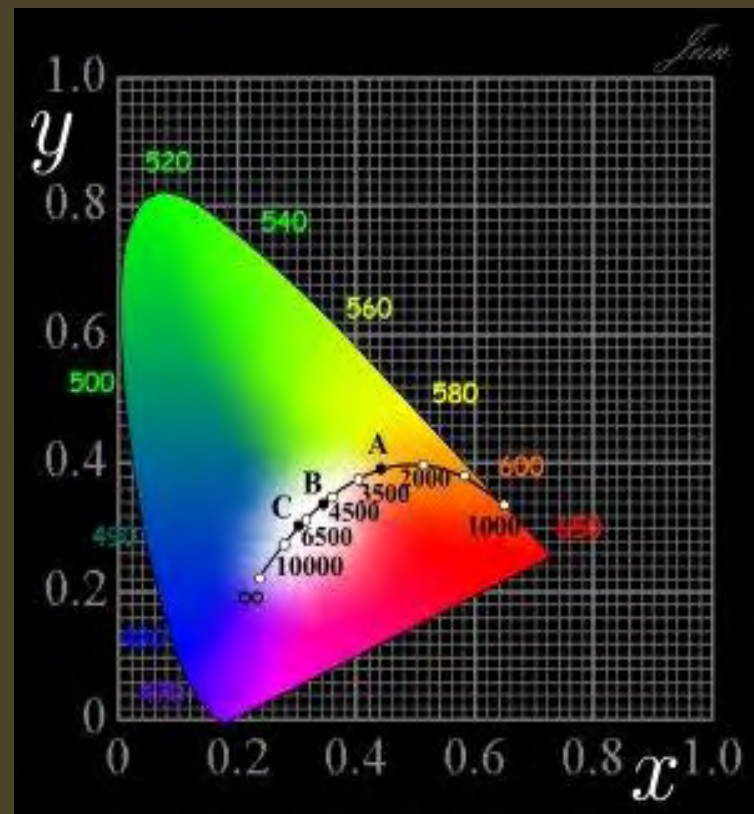


例 (0.6, 0.3) → 赤
(0.2, 0.6) → 緑

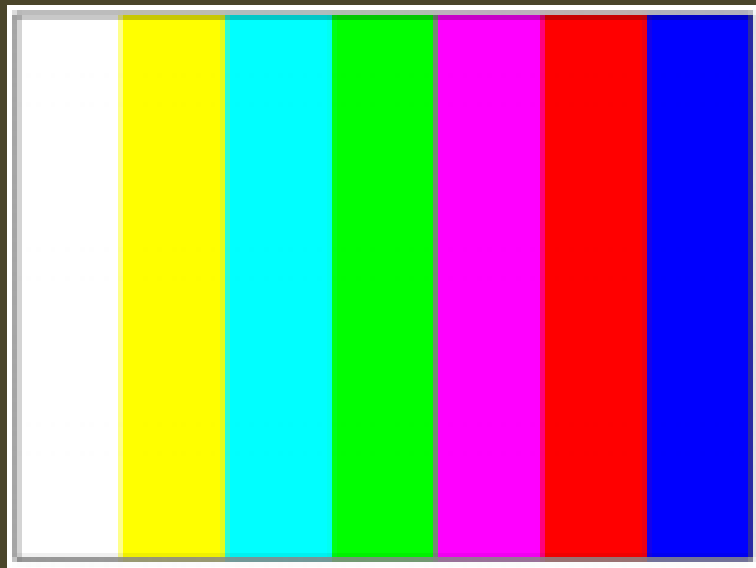
- 表色（色を表す）のためには、一般に3つの数値が必要ですが、明るさの情報を犠牲にして2つの数値で色を表し、2次元の図に表現したものを、色度図といいます。
- ここで、XYZから $x=X/(X+Y+Z)$, $y=Y/(X+Y+Z)$ という正規化変換をして、 x 、 y 2つの座標系で全ての色を表すのが、図に示すCIEの色度図です。
- x 、 y とRGBの関係は、 $x=0.6R-0.28G-0.32B$
 $y=0.2R-0.52G+0.31B$ で表されます。

CIE色度図と色温度

- ある温度で光っている(熱放射・黒体放射している)物体の色を測定して、温度と色の関係を色度図上に描くことができます。この曲線は黒体放射の色軌跡と呼ばれます。なお、一般の光源は黒体放射をしているわけではないので、色軌跡の上のある色で光っている光源の温度が、その点に対応する温度になっているとは限りません。そのため、色から決まる温度を色温度といいます。

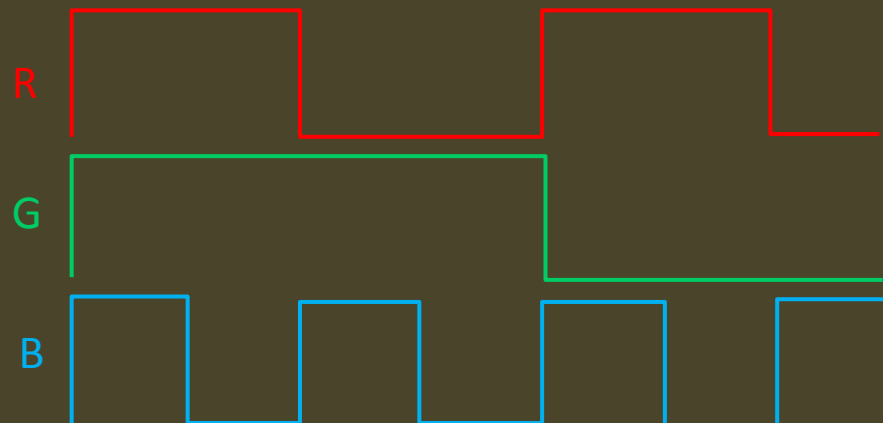


カラーバー

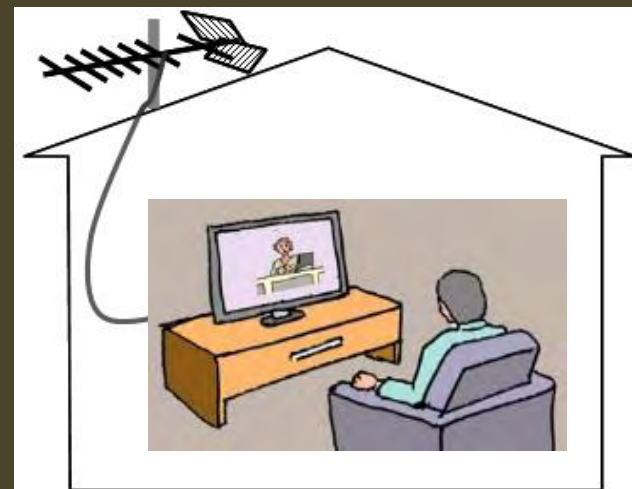
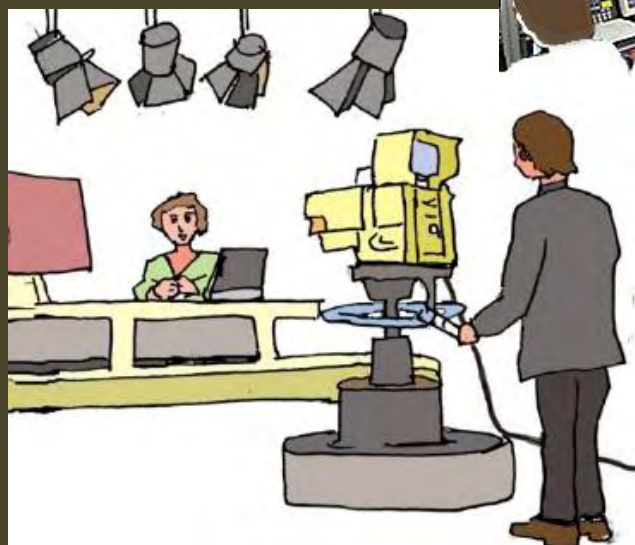
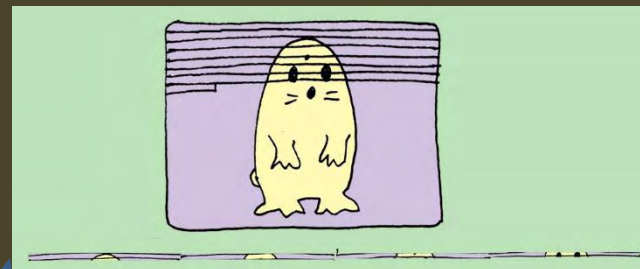
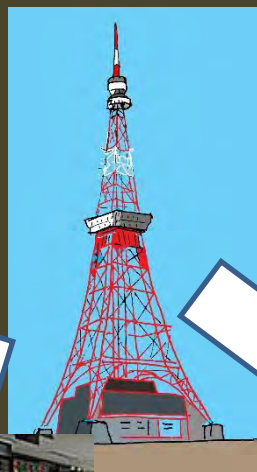
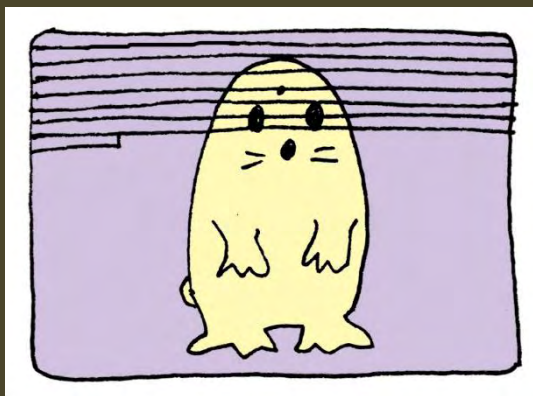


色	白	黄	シ ア ン	緑	マ ゼ ン タ	赤	青
R	1	1	0	0	1	1	0
G	1	1	1	1	0	0	0
B	1	0	1	0	1	0	1

- White=R+G+B,
Yellow=R+G,
Cyan=G+B,
Magenta=R+B



テレビ放送

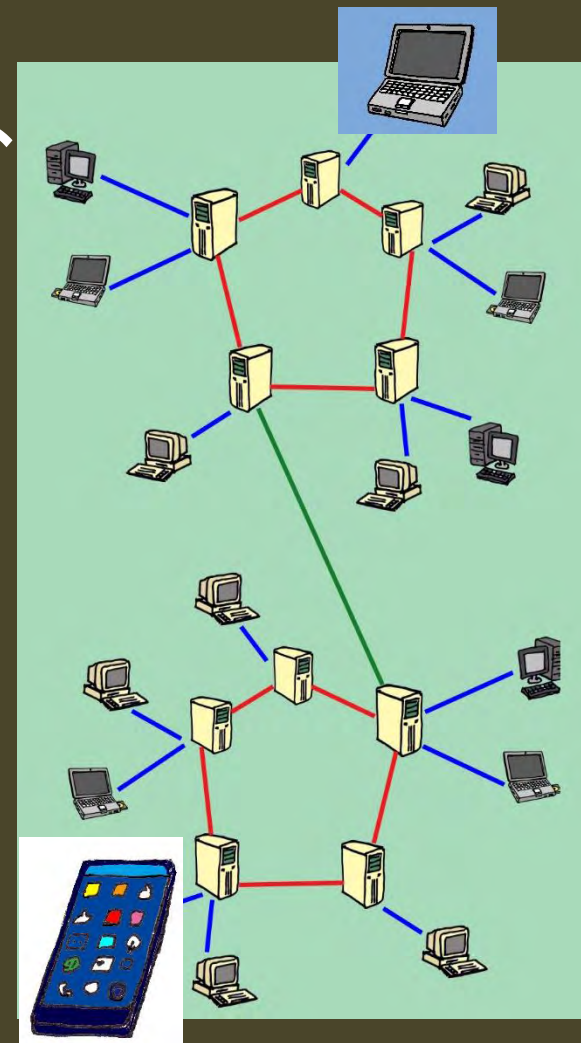


The background of the slide features two optical fibers extending from the bottom left towards the center. The fibers are dark, and their tips are surrounded by vibrant, multi-colored light trails in shades of red, orange, yellow, green, and blue, suggesting the transmission of light signals. The overall scene is set against a dark, blurred background.

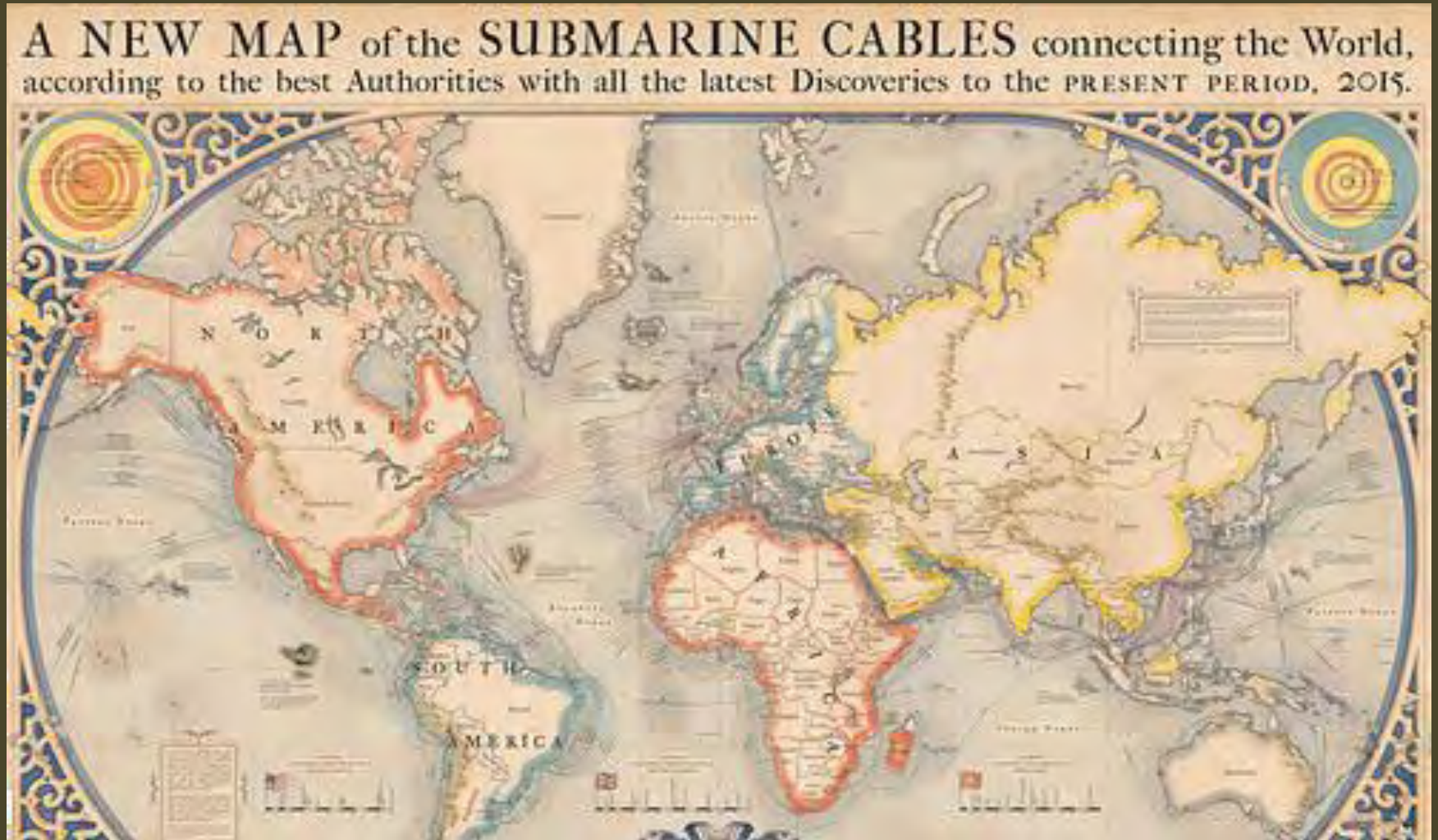
光通信を学ぶ

情報通信を変えた 光ファイバー通信

- 検索サイトで調べ物をするとき、情報はインターネットで世界中に繋がり、瞬時に答えが返ってきます。
- 世界中に光ファイバー通信網に張り巡らされていることで、これが可能になったのです。

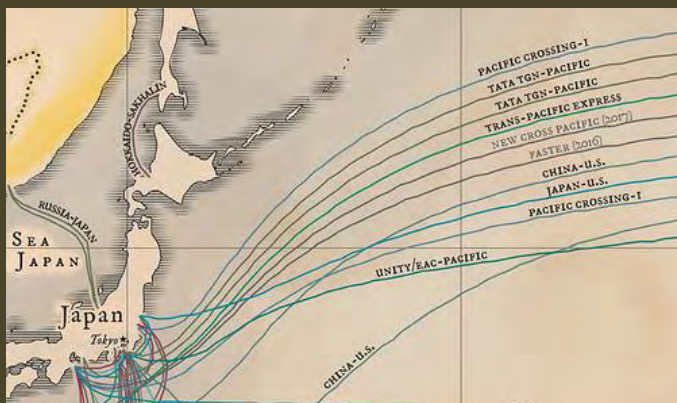
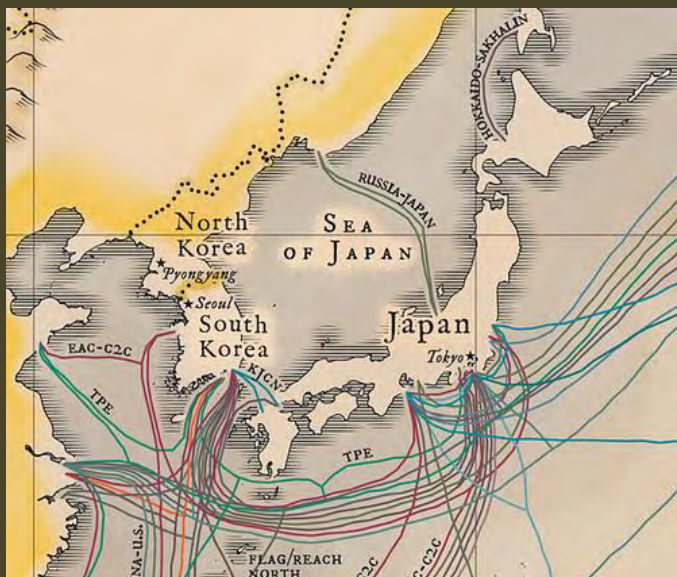


海底ケーブル地図



<http://submarine-cable-map-2015.telegeography.com/>

海底ケーブルの敷設



海底ケーブルの敷設と補修は、海底ケーブル敷設船という特殊船が利用される。19世紀のCSファラデー号(英)や20世紀のKDD丸(日)が世界的に知られている。敷設船が造られる前は、グレート・イースタン号(英)のように、他の目的で造られた船を改造して使用していた。

日米間の海底ケーブル

- 日米間に横たわる太平洋。その海底には総延長約9000kmもの通信用ケーブルが敷設されている。
- この太平洋横断ケーブルが初めて開通したのは1964年。当時は、まだ真空管式と同軸アナログケーブルによる電話回線で、容量はたったの128回線分しかなかった。
- 以後、様々な技術革新を経て、1995年には5代目のケーブルが開通。2000年前後にはChina-US、Japan-USの各ケーブルが敷設された。
- そして2010年3月、新ケーブル「Unity」の運用がスタート。通信容量最大4.8Tbps、96波入りのファイバーが5組入っている。初代TPCと比べると、約45万倍の大容量・高速回線。

光ファイバー通信とは

- 国際的な通信は、人工衛星を介したものと、光ファイバーを介したものの2種類があります。
- 静止衛星は地上3万5千kmにいたので地上との往復に0.23秒もかかります。1万kmを光ファイバーで直接結べば0.05秒でとどきます。
- 国内の通信網の基幹線は全部光ファイバーです。最近は、末端の家庭にまで光回線がとどいています。

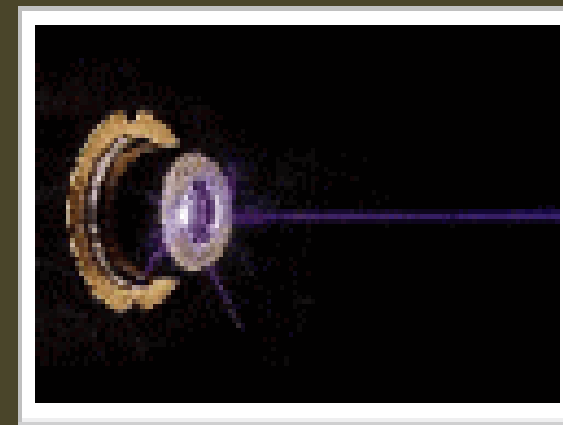
光通信の要素技術

- 光源：半導体レーザー(LD=laser diode)
 - pn接合, DH構造, DFB構造, 高速化
- 線路：光ファイバー
 - 全反射, レーリー散乱, 分子振動
- 光検出器：フォトダイオード(PD)
 - アバランシェ型(APD)
- 中継器：ファイバーアンプ(EDFA)
- 光制御器：アイソレータ、アッテネータ、サーキュレータ

要素技術

半導体レーザー LD (laser diode)

- LED構造において、劈開面を用いたキャビティ構造を用いるとともに、**ダブルヘテロ構造**により、光とキャリアを活性層に閉じ込め、反転分布を作る。
- **DFB構造**をとることで特定の波長のみを選択している。



半導体レーザーの材料

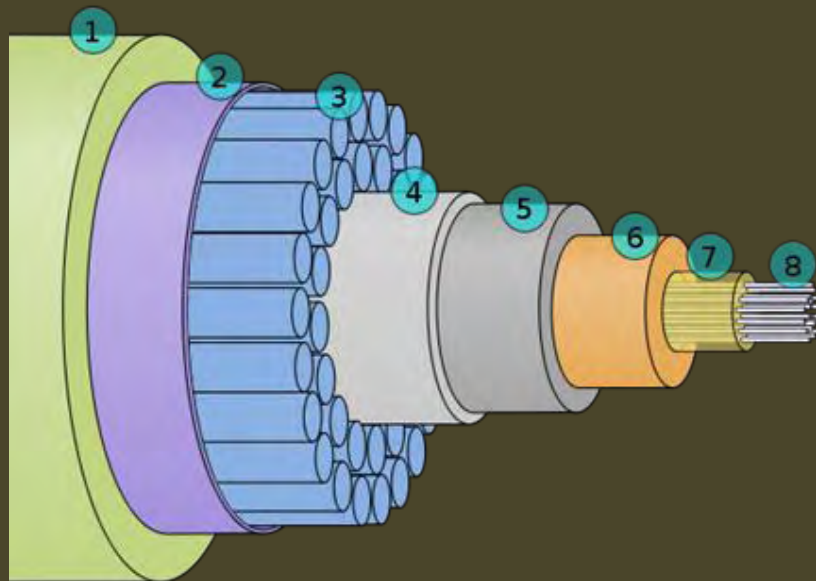
- 光通信帯用 : 1.5 μm ; GaInAsSb, InGaAsP
- CD用 : 780nm GaAs
- DVD用 : 650nm GaAlAs MQW
- 次世代DVD用 : 405nm InGaN

バルク基板にMOVPE、MBEなど気相成長によって薄膜をエピタキシャル成長している。

MOVPE: metal-organic vapor phase epitaxy

MBE: molecular beam epitaxy

要素技術 光ケーブル

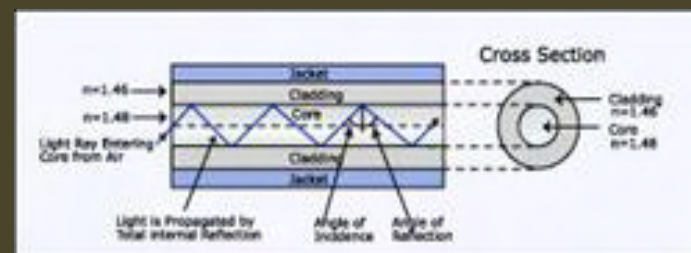


ケーブルの構造

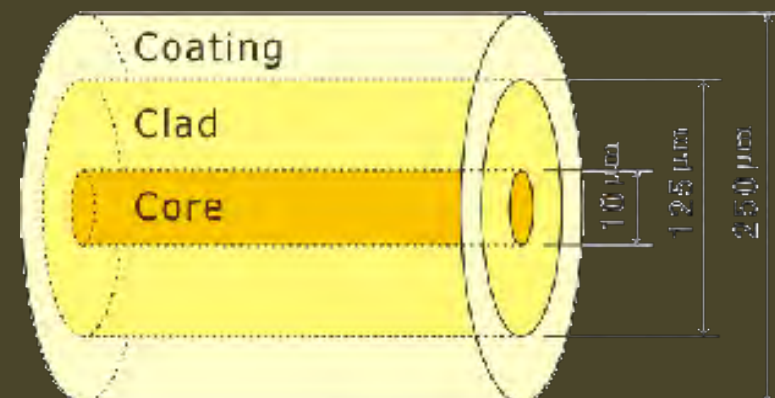
1. ポリエチレン
2. マイラーテープ
3. 鋼鉄線
4. アルミニウム耐水膜
5. ポリカーボネート
6. 銅又はアルミニウムチューブ
7. ワセリン
8. 光ファイバー

要素技術 光ファイバー

- 材料：熔融石英(fused silica SiO_2)
- 構造：同心円状にコア層、クラッド層、保護層を配置
- 光はコア層を全反射によって長距離にわたり低損失で伝搬

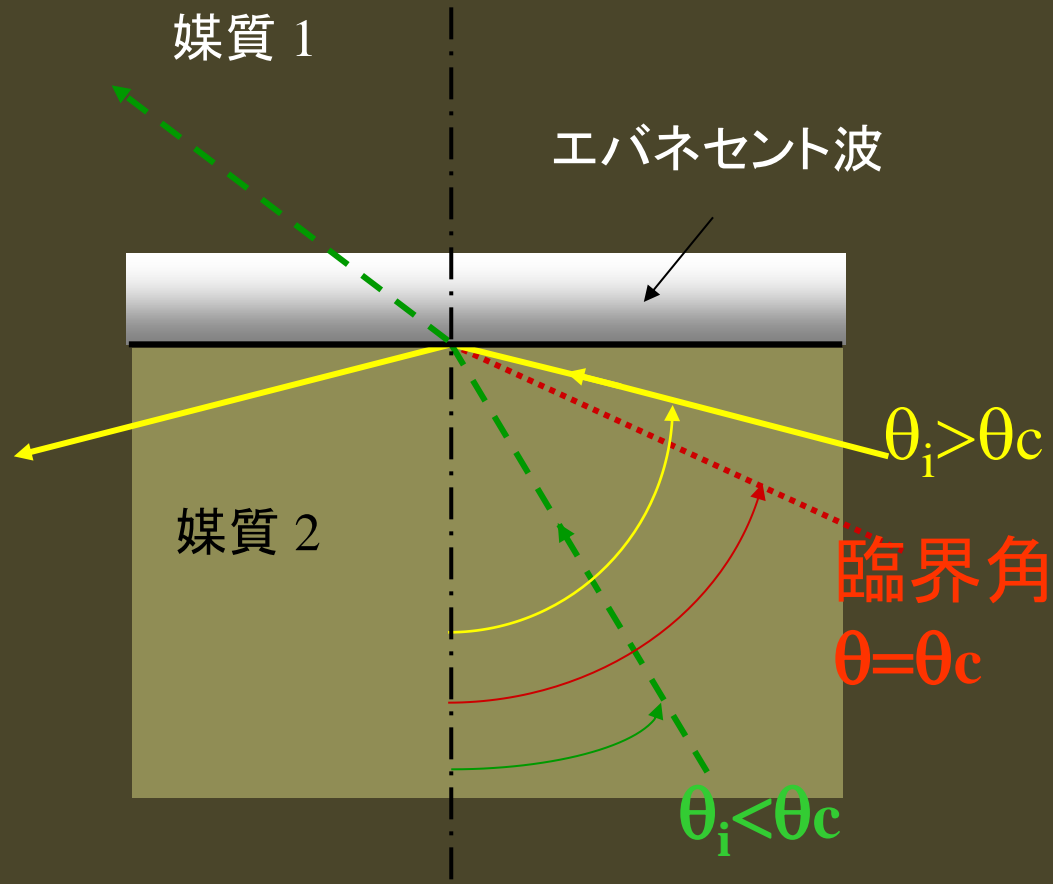


<http://www.miragesofttech.com/ofc.htm>



東工大影山研HPより

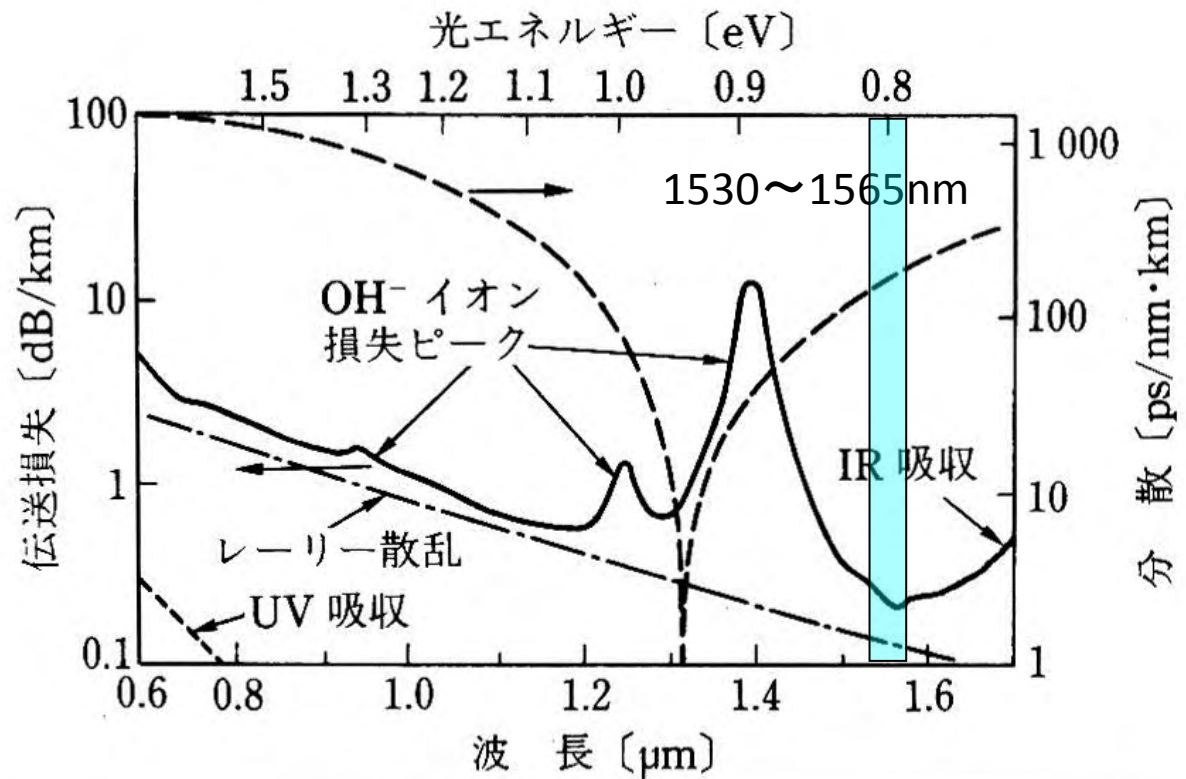
全反射



全反射とエバネセント波

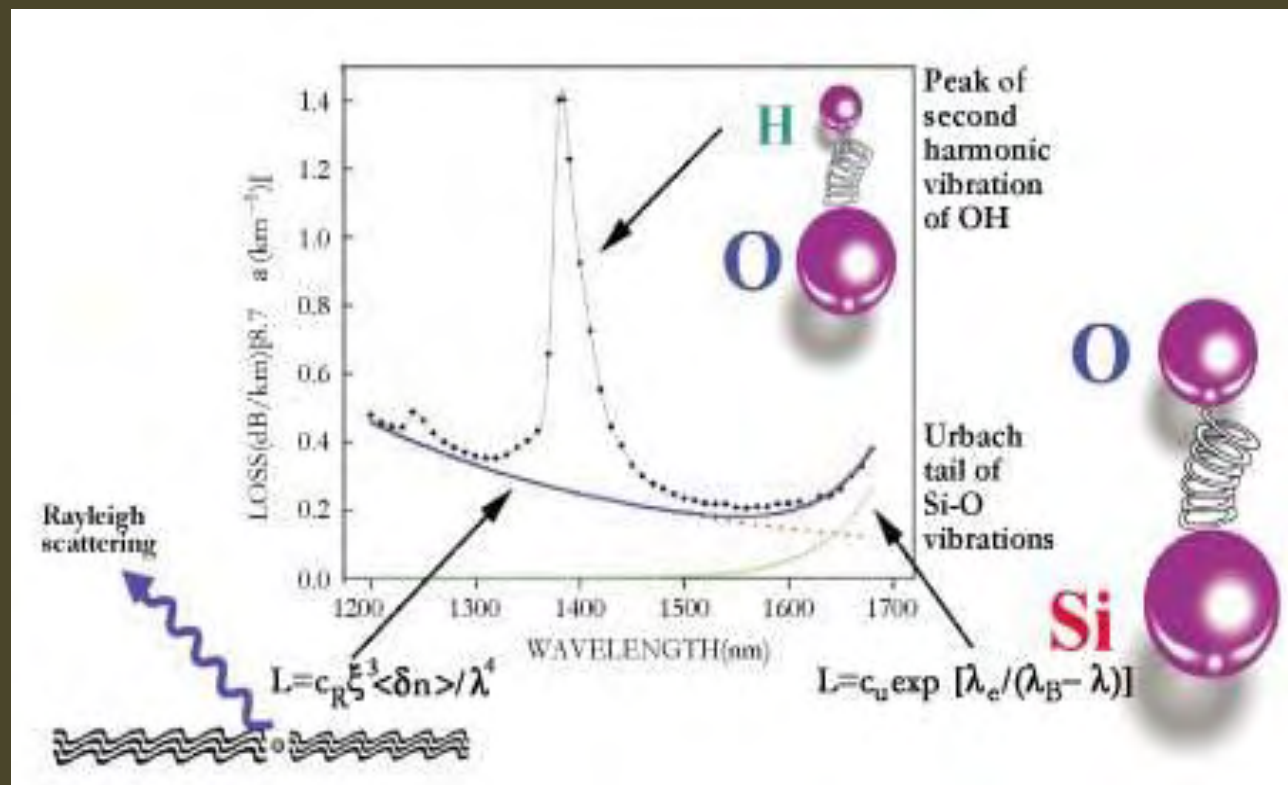
光ファイバーの伝搬損失

- 短波長側の伝送損失はレーリー散乱
- 長波長側の伝送損失は分子振動による赤外吸収
- 1.4 μm 付近の損失はOHの分子振動による



超低損失光ファイバの伝送損失および分散特性

光ファイバーの伝搬損失



Physics Today Onlineによる
<http://www.aip.org/pt/vol-53/iss-9/captions/p30cap1.html>

光はどこまで遠く伝わる？

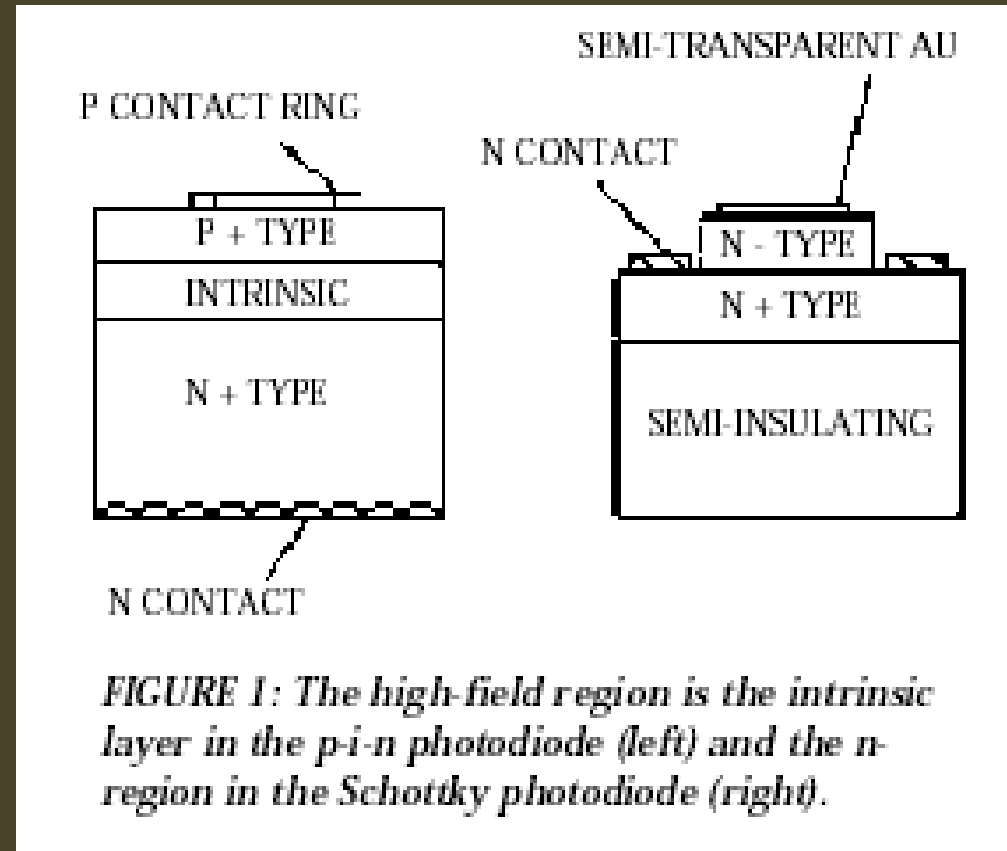
- 低損失ファイバーの減衰は0.2dB/kmである。
東京から富士山まで約100kmとして、光強度はもとの何%になるだろうか
- 損失は $0.2 \times 100 = 20$ dBです。
- powerの損失に対するdBの定義 $\text{dB} = 10 \log(I_0/I)$ を用いると、 $20 = 10 \log(I_0/I)$ より、 $I/I_0 = 10^{-2}$
- 従って、もとの1%に減衰するのです。

要素技術 光検出

- フォトダイオードを用いる
- 高速応答の光検出が必要
- pinフォトダイオードまたはショットキー接合フォトダイオードが使われる。(注:ショットキー接合:金属と半導体の接合)
- 通信用PDの材料としてはバンドギャップの小さなInGaAsなどが用いられる。

光検出器

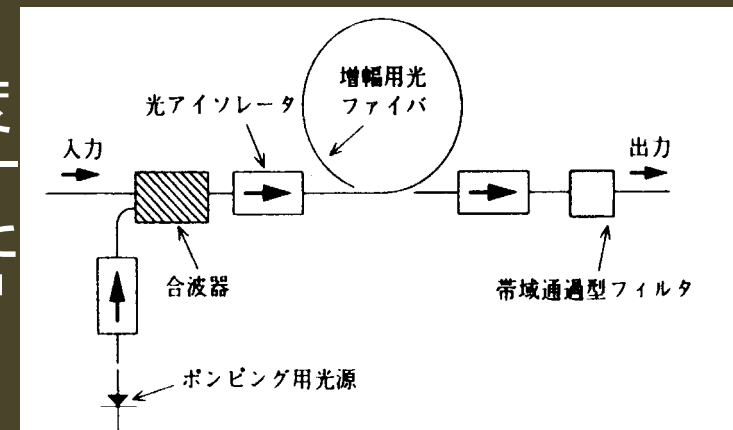
- Pin-PD
- Schottky PD
- 応答性は、空乏層をキャリアが走行する時間と静電容量で決まる。
- このため、空乏層を薄くするとともに、接合の面積を小さくしなければならない。



要素技術

光中継：ファイバーアンプ

- 光ファイバー中の光信号は100km程度の距離を伝送されると、20dB(百分の一に)減衰する。これをもとの強さに戻すために光ファイバーアンプと呼ばれる光増幅器が使われている。
- 光増幅器は、エルビウム(Er)イオンをドープした光ファイバー(EDF:Erbium Doped Fiber)と励起レーザーから構成されており、励起光といわれる強いレーザーと減衰した信号光を同時にEDF中に入れることによって、Erイオンの誘導増幅作用により励起光のエネルギーを利用して信号光を増幅することができる。



旭硝子の

HPhttp://www.agc.co.jp/news/2000/0620.htmlより

エルビウムの増幅作用

- エルビウム (Er) イオンをドープしたガラスは、980nm や 1480nm の波長の光を吸収することによって 1530nm 付近で発光する。この発光による誘導放出現象を利用することによって光増幅が可能になる。
具体的には、EDF に増幅用のレーザー光を注入すると、Er イオンがレーザー光のエネルギーを吸収し、エネルギーの高い状態に一旦励起され、励起された状態から元のエネルギーの低い状態に戻るときに、信号光とほぼ同じの 1530nm 前後の光を放出する (誘導放出現象)。信号光は、この光のエネルギーをもらって増幅される。
- Er をドープするホストガラスの組成によって、この発光の強度やスペクトル幅 (帯域) が変化する。発光が広帯域であれば、光増幅できる波長域も広帯域になる。

要素技術

光アイソレータ

- 光アイソレータ: 光を一方向にだけ通す光デバイス。
- 光通信に用いられている半導体レーザ(LD)や光アンプは、光学部品からの戻り光により不安定な動作を起こす。
- 光アイソレータ: 出力変動・周波数変動・変調帯域抑制・LD破壊などの戻り光による悪影響を取り除き、LDや光アンプを安定化するために必要不可欠な光デバイス。

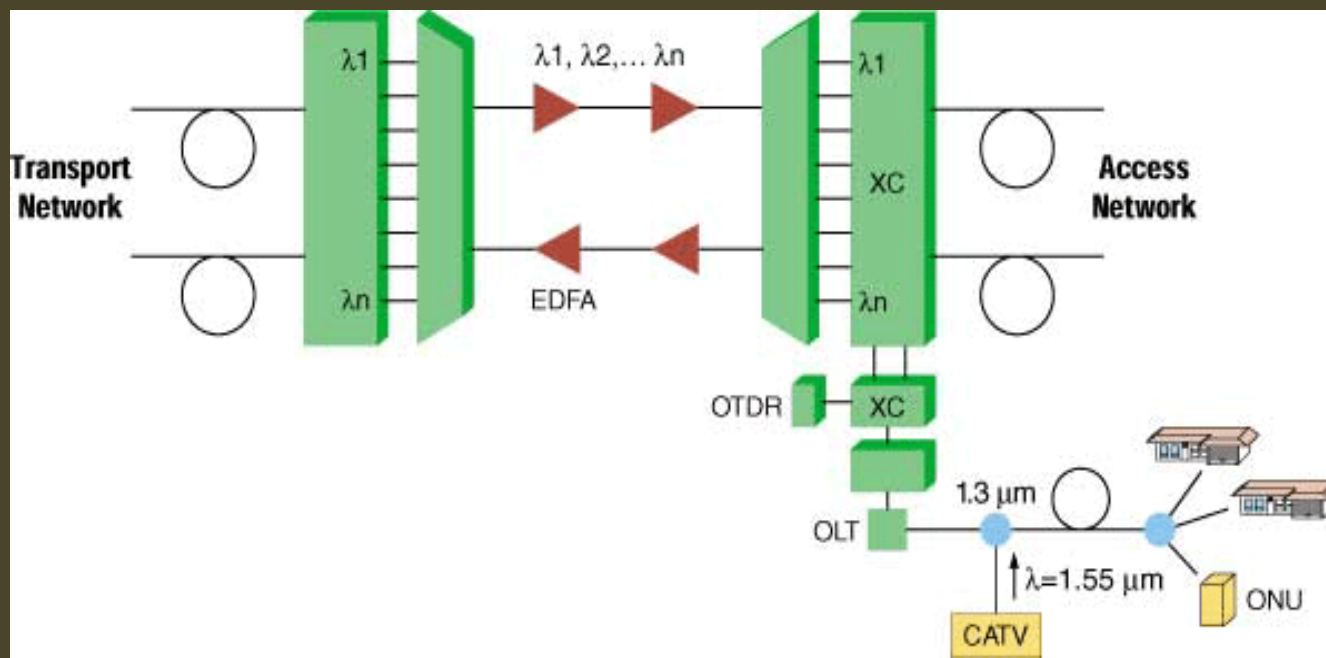


信光社
<http://www.shinkosha.com/products/optical/>

要素技術

波長多重(WDM=wavelength division multiplexing)

- この方式は、波長の異なる光信号を同時にファイバー中を伝送させる方式であり、多重化されたチャンネルの数だけ伝送容量を増加させることができる。
- 通信用光ファイバーは、1450~1650nmの波長域の伝送損失が小さい(0.3dB/km以下)ため、原理的にはこの波長域全体を有効に使うことができる。



さまざまな光ディスクとその原理



光ディスクのポイント

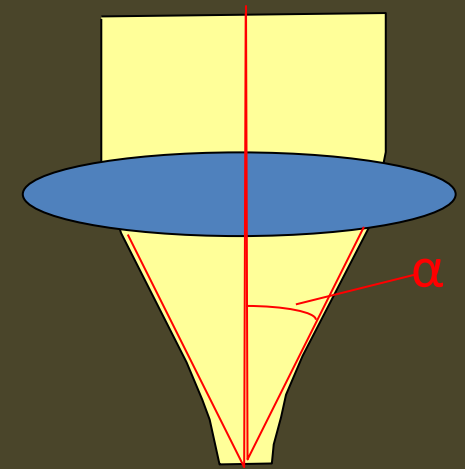
- 読み出しは、レーザー光を絞ったときに回折限界で決まるスポットサイズで制限されるため、波長が短いほど高密度に記録される。
- 光ストレージには、読み出し(再生)専用のもの、1度だけ書き込み(記録)できるもの、繰り返し記録・再生できるものの3種類がある。
- 記録には、さまざまな物理現象が使われている。

光記録の分類

- 光ディスク
 - 再生(読み出し)専用のもの
 - CD, CD-ROM, DVD-ROM
 - 記録(書き込み)可能なもの
 - 追記型(1回だけ記録できるもの)
 - CD-R, DVD-R
 - 書換型(繰り返し消去・記録できるもの)
 - 光相変化 CD-RW, DVD-RAM, DVD-RW, DVD+RW, BD
 - 光磁気: MO, GIGAMO, MD, Hi-MD, AS-MO, iD-Photo
- ホログラフィックメモリ、ホールバーニングメモリ

記録密度を決めるもの 光スポットサイズ

- $d=0.6\lambda/NA$
 - λ は光の波長
 - NA はレンズの開口数
 - $NA=n\sin\alpha$
- CD-ROM: $NA=0.6$
CD-ROM: $\lambda=780\text{nm}\rightarrow d=780\text{nm}$
DVD: $\lambda=650\text{nm}\rightarrow d=650\text{nm}$
BD: $NA=0.85$
 $\lambda=405\text{nm}\rightarrow d=285\text{nm}$



スポット径 d

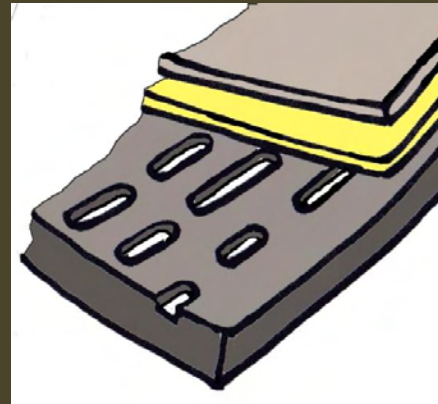
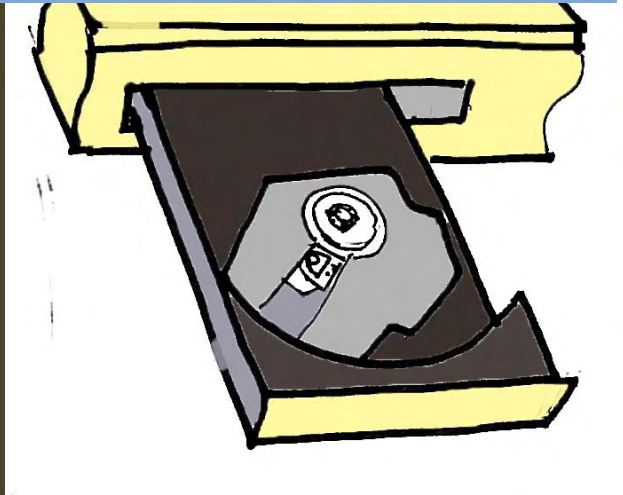
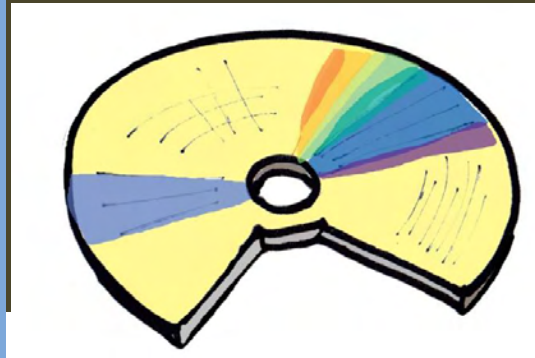
光記録に利用する物理・化学現象

- CD=compact disk, DVD=digital versatile disk, BD=bluray disk
- CD-ROM, DVD-ROM: ROM=read only memory
 - ピット形成
- CD-R, DVD-R: R=recordable
 - 有機色素の化学変化と基板の熱変形
- CD-RW, DVD-RW, BDR: RW=rewritable
 - アモルファスと結晶の相変化
- MO, MD, GIGAMO, AS-MO, iD-Photo:
 - 強磁性・常磁性相転移
- ホログラフィックメモリ: フォトリフラクティブ効果
- ホールバーニングメモリ: 不均一吸収帯

光ディスクの特徴

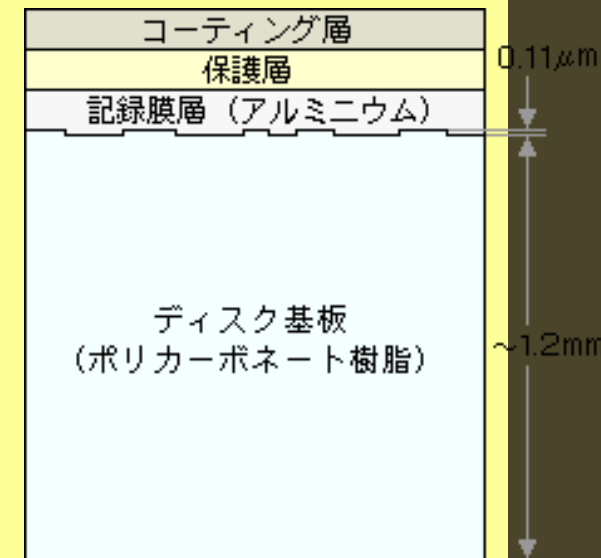
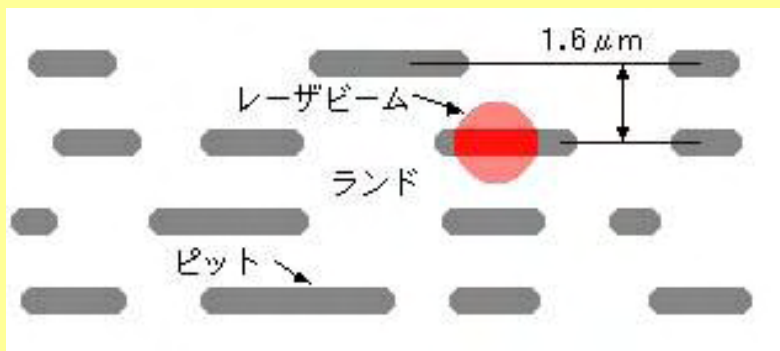
- リムーバブル(とりはずして持ち運べる)
- 大容量・高密度
 - BD 100Gb/in²:ハードディスク(500Gbit/in²)に及ばない
 - 超解像、短波長、近接場を利用してもっと高密度にへ
- ランダムアクセス
 - 磁気テープに比し圧倒的に有利;
カセットテープ→MD, VTR→DVD
 - ハードディスクに比べるとシーク時間が長い
- 高信頼性
 - ハードディスクに比し、ヘッドの浮上量が大きい

CD-ROM



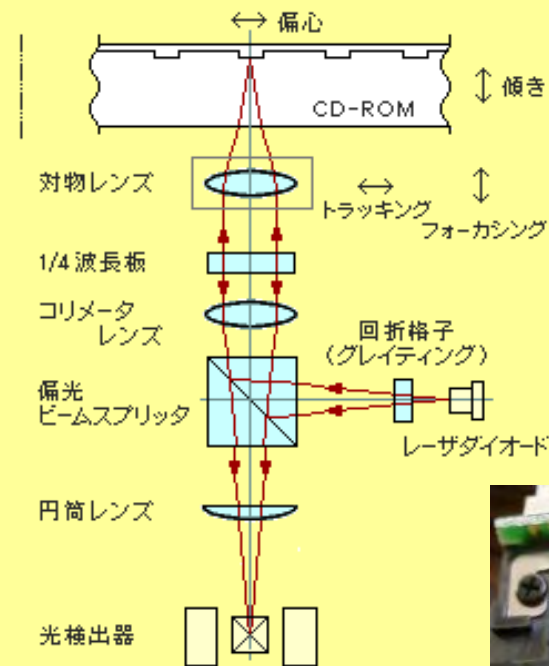
CD-ROM: 光の干渉を利用

- ポリカーボネート基板: $n=1.55$
- $\lambda=780\text{nm} \rightarrow$ 基板中の波長 $\lambda'=503\text{nm}$
- ピットの深さ: $110\text{nm} \sim \frac{1}{4}$ 波長
- 反射光の位相差 π : 打ち消し

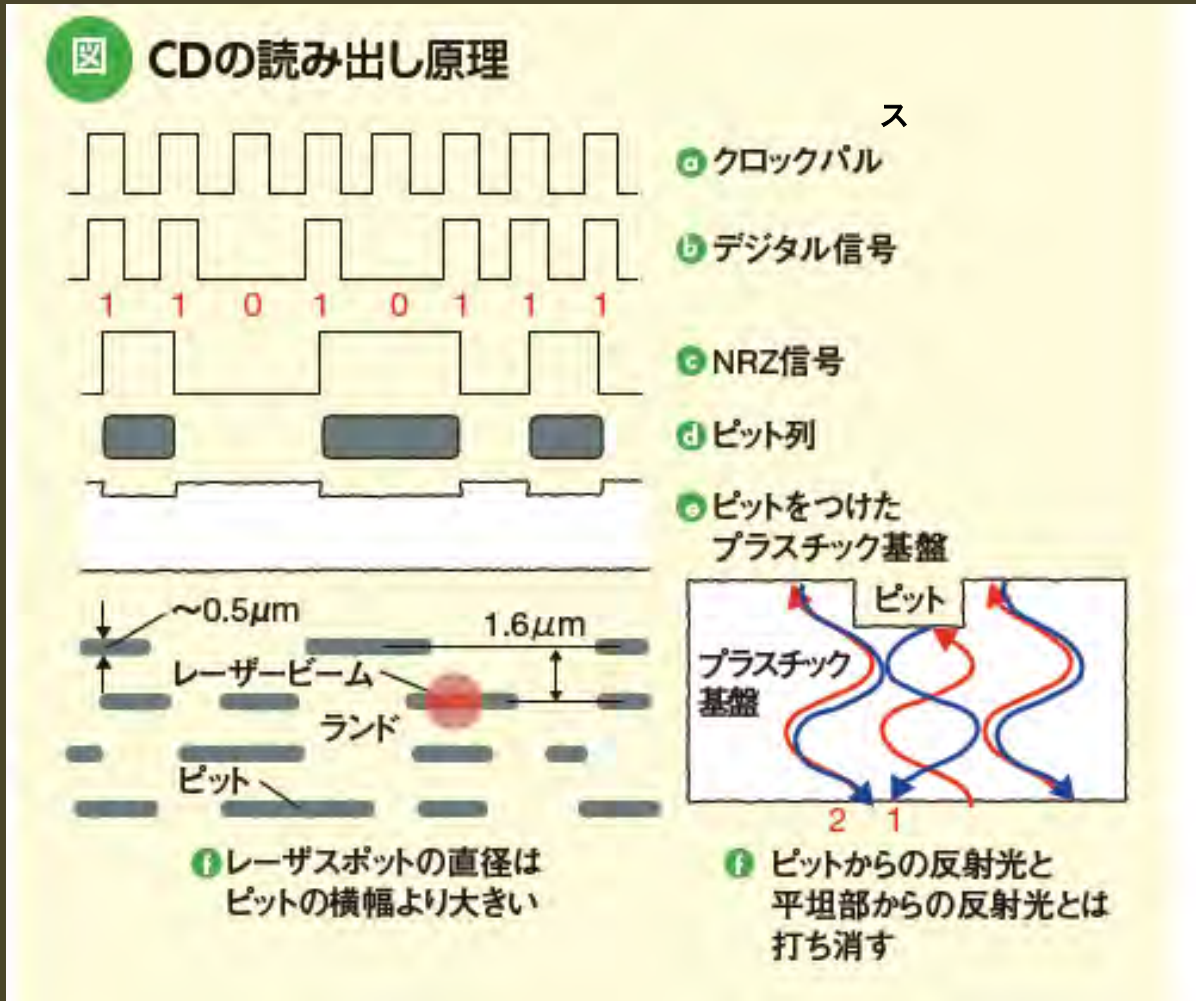


CD-ROMドライブ

- フォーカスサーボ
- トラッキングサーボ
- 光ピックアップ

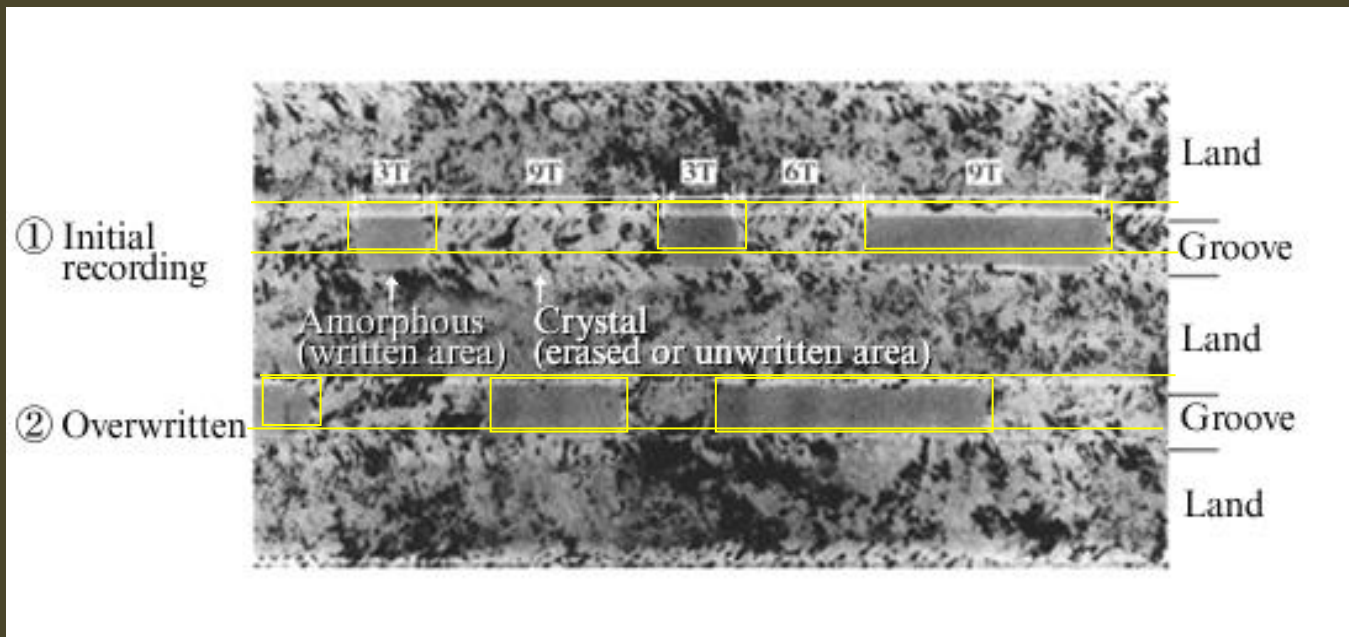
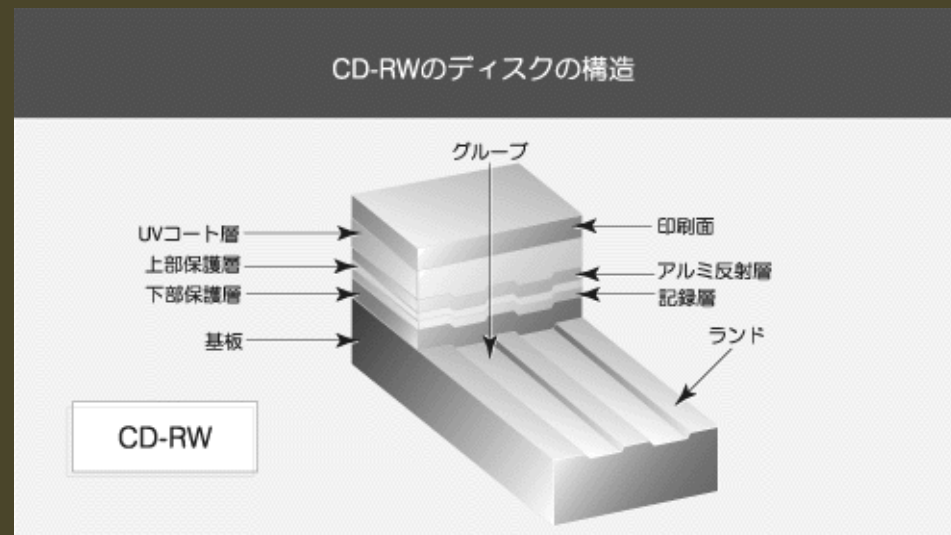


CDはどうやって情報を読み出すのか？



CD-RW

- 光相変化ディスク
- 結晶とアモルファスの間の相変化を利用



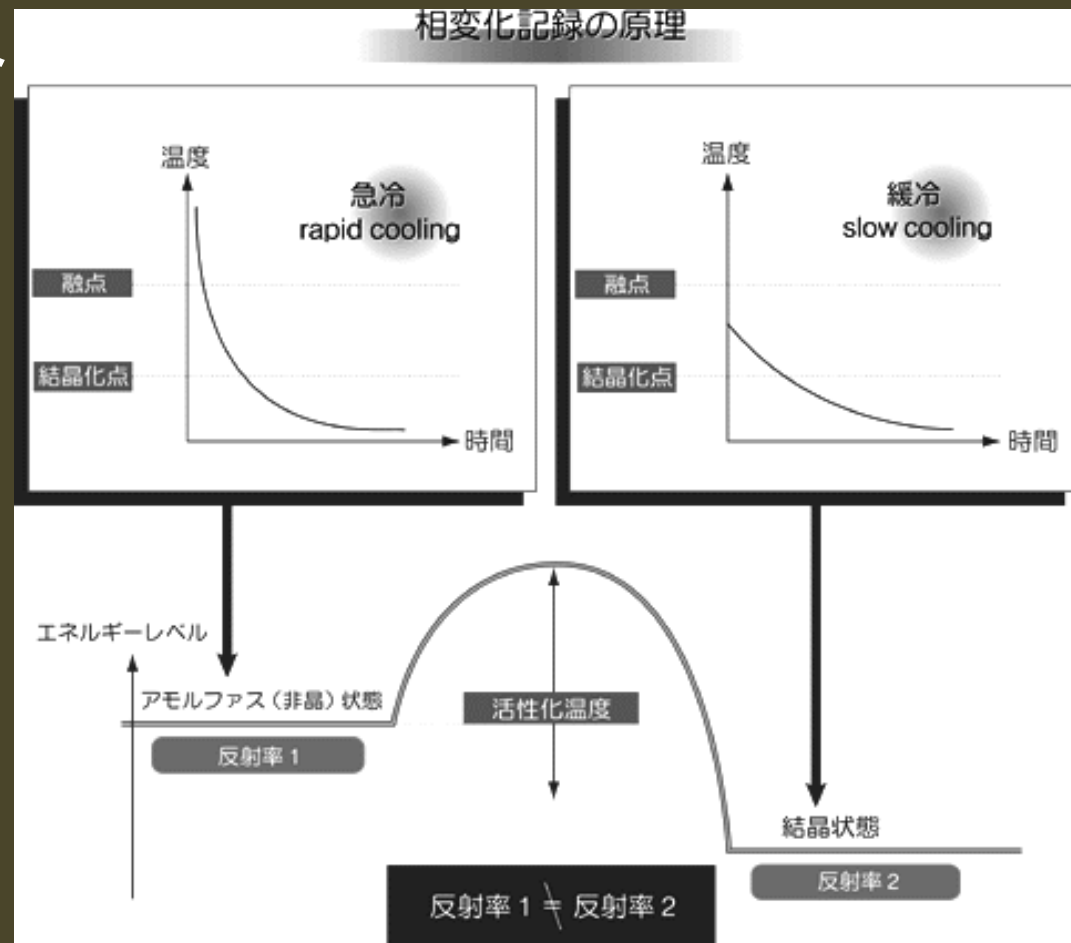
光相変化記録

- アモルファス/結晶の相変化を利用
 - 書換可能型 成膜初期状態のアモルファスを熱処理により結晶状態に初期化しておきレーザー光照射により融点 T_m (600°C)以上に加熱後急冷させアモルファスとして記録。消去は結晶化温度 T_{cr} (400°C)以下の加熱緩冷して結晶化。
 - Highレベル: T_m 以上に加熱→急冷→アモルファス
 - Lowレベル: T_{cr} 以上に加熱→緩冷→結晶化
- DVD-RAM: GeSbTe系
- DVD±RW: Ag-InSbTe系

相変化ディスクの記録と消去

- 融点以上から急冷
アモルファス
→低反射率
- 融点以下、結晶化
温度以上で徐冷：
結晶化
→高反射率

http://www.cds21solutions.org/main/osj/j/cdrw/rw_phase.html



相変化と反射率

初期状態: 結晶状態

記録状態: アモルファス状態

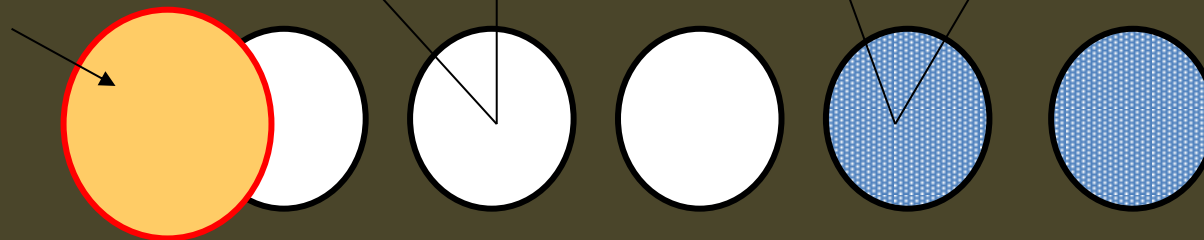
反射: 大

反射: 小

記録

消去

レーザースポット



記録マーク

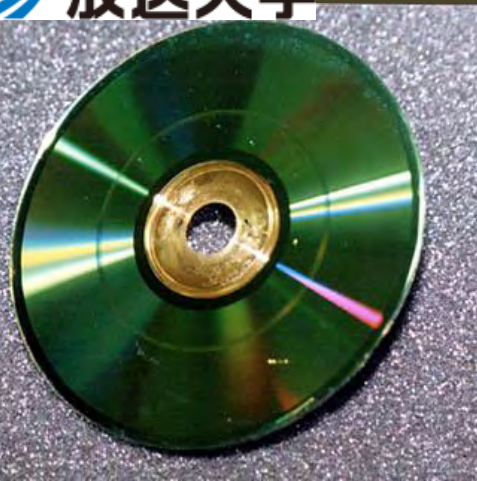
アモルファスとはなにか

- Amorphous aは否定の接頭辞morphは形
 - 非晶質と訳される
 - 近距離秩序はあるが、結晶のような長距離秩序がない
 - 液体の原子配列が凍結した状態に近い
 - 液体の急冷により生じる準安定な状態
 - 金属合金系、カルコゲナイドガラス系、テトラヘドラル系、酸化物ガラス系などがある
 - 金属合金系の場合DRPHS (dense random packing of hard spheres)モデルで説明できる

アモルファスの特徴

- 結晶ではないので結晶粒界がなく連続
 - 大面積を均一に作れる。
 - 光の散乱が少ない
- 結晶と違って整数比でない広範な組成比が実現：特性を最適化しやすい
- 低温成膜可能なので、プラスチック基板でもOK

CD-R: 有機色素の利用



- 有機色素を用いた光記録
- 光による熱で色素が分解
- 気体の圧力により加熱された基板が変形
- ピットとして働く

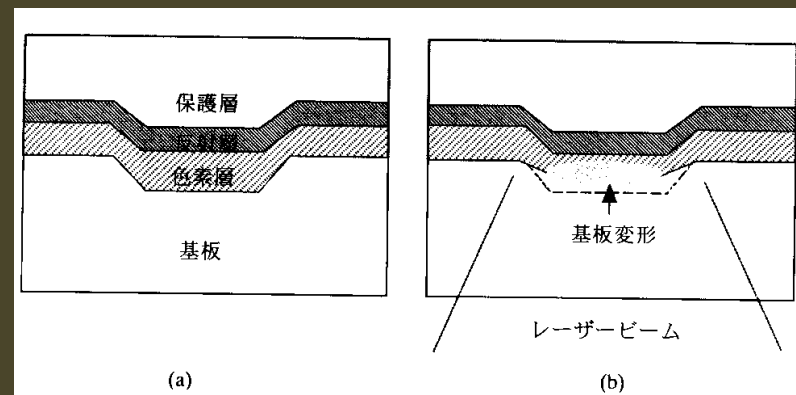
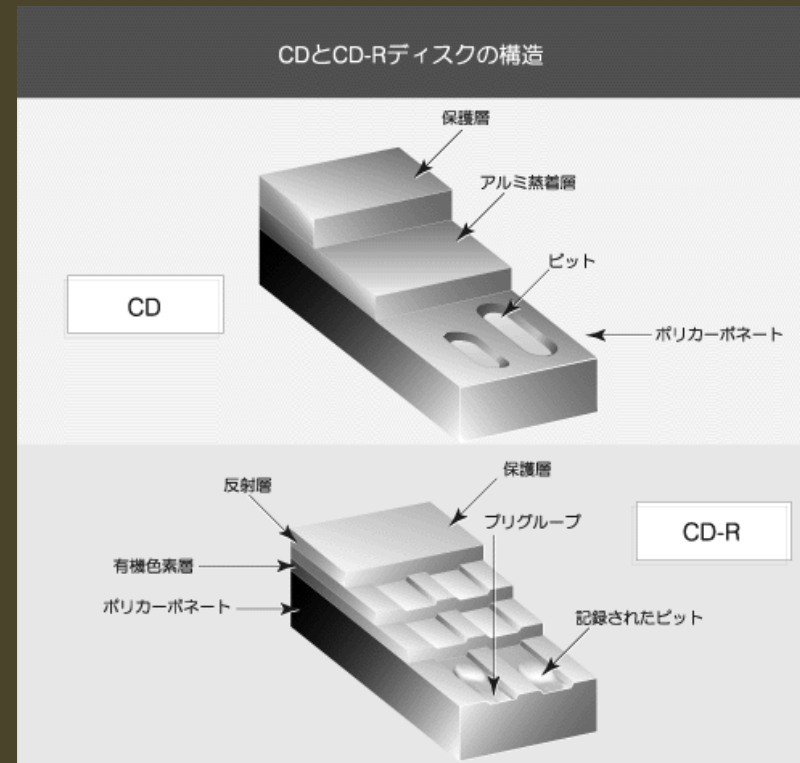


図1 未記録状態(a)、記録状態(b)を示す模式図

DVDファミリー

	DVD-ROM	DVD-R	DVD-RAM	DVD-RW	DVD+RW
容量(GB)	4.7 / 9.4 2層8.54	3.95 / 7.9	4.7 / 9.4	4.7/9.4	4.7/9.4
形状	disk	disk	cartridge	disk	disk
マーク形成 材 料	ピット形成 1層 R=45-85 2層 R=18-30	熱変形型 有機色素 R=45-85%	相変化型 GeSbTe系 R=18-30%	相変化型 AgInSbTe系 R=18-30%	相変化型 AgInSbTe系 R=18-30%
レーザ波長 レンズNA	650/635 0.6	650/635 0.6	650 0.6	638/650 0.6	650 0.65
最短マーク長	1層:0.4 2層:0.44	0.4	0.41-0.43	0.4	0.4
トラック幅	0.74	0.8 Wobbled Land pre-bit	0.74 Wobbled L/G	0.74 Wobbled Land pre-bit	0.74 HF Wobbled groove
書き換え可能 回数	—	—	10^5	10^3 - 10^4	10^3 - 10^4

BDはなぜ高密度化

- 我が国で開発された青紫色レーザーは、複数の会社から安定供給できるようになり、これを用いた光ディスクが登場した。
- 光ディスクの面密度は原理的に $1/d^2$ で決まるので、波長が従来の650nmから405nmに変わることにより、原理的に2.6倍の高密度化が可能になった。
- NAの大きなレンズを使用しているので絞り込める。
BD:0.85 DVD: 0.65
- 記録層が表面から0.1mmと浅い。
DVDでは表面から0.6mmと深い



BDの規格

規格	
容量(片面1層)	23.3/25/27 GB
容量(片面2層)	46.6/50/54 GB
転送速度	36Mbps
ディスク厚み	1.2mm 保護層0.1mm
記録層	記録層1.1 μ m
レーザー波長	405nm
レンズ開口数	0.85
トラックピッチ	0.32 μ m
トラック構造	グループ
映像圧縮方式	MPEG-2 Video

液晶ディスプレイ

液晶ディスプレイ

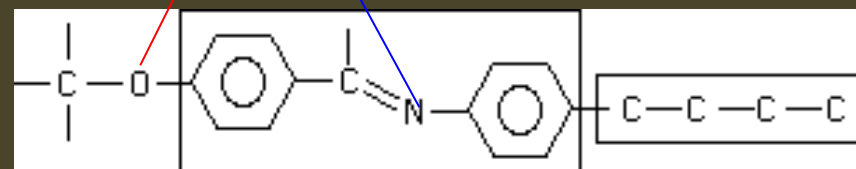
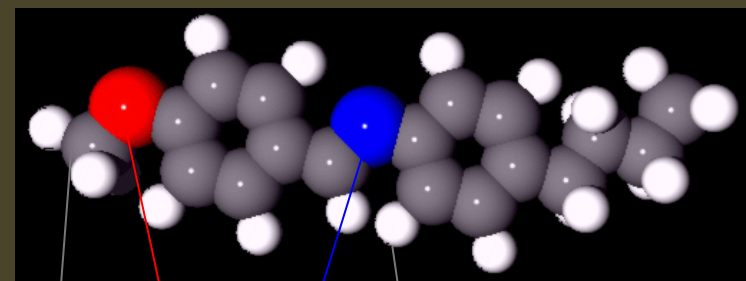
- 液晶を光スイッチとして使用
 - 直交偏光板ではさんだ液晶内での偏光の伝搬
 - 電界印加により液晶分子の配向を制御
 - TFT(薄膜トランジスタで各画素のRGBを個別に選択制御): アモルファスSiから多結晶Siへ
 - 利点: 薄型、省電力、高精細度、ちらつきがない
 - 欠点: 視角依存性、バックライト必要、大画面に問題



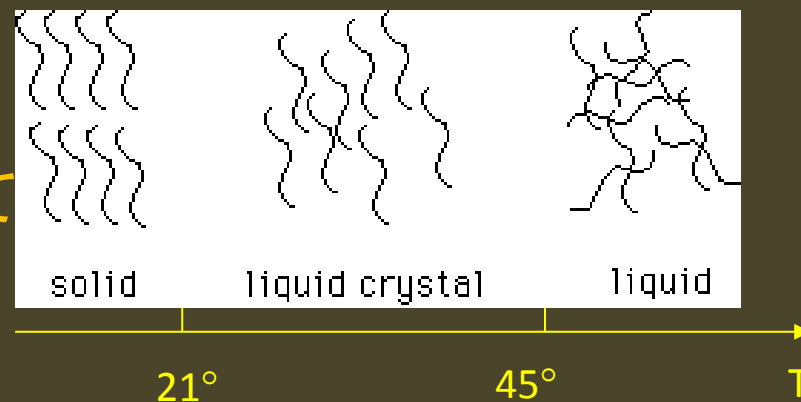
液晶

●液晶は、液体と固体の中間的物質

- 1888年：液晶を発見：ライニツァー(オーストリアの植物学者)
- 「液晶」とは、固体と液体の中間にある物質の状態(イカの墨や石鹼水など)を指す。
- 液晶の理学は1968年頃、フランスの物理学者de Gennesによって確立された。



www.chem.wisc.edu/

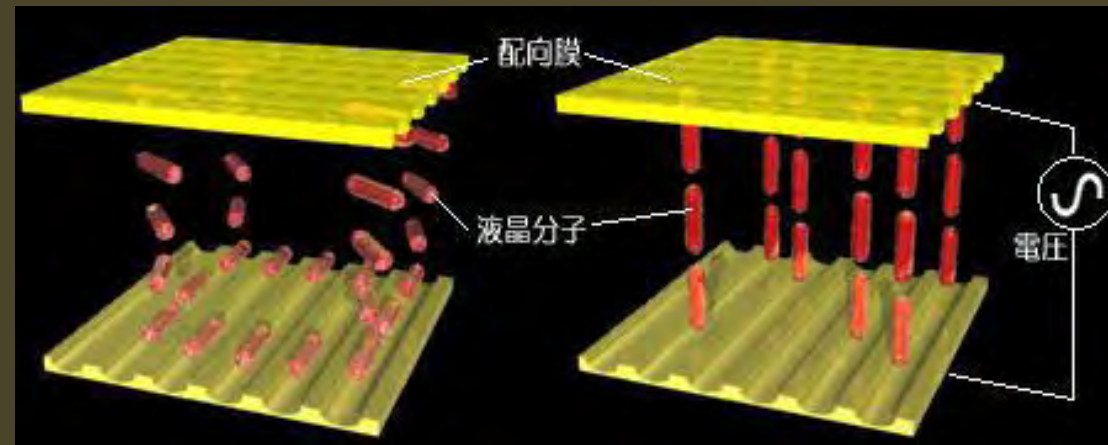


液晶のディスプレイへの応用

- ディスプレイへの応用：1963年ウィリアムズ(RCA社)、液晶に電気的な刺激を与えると、光の透過が変わることを発見。
- 1968年：ハイルマイヤーら(RCA)、この性質を応用した表示装置を試作→液晶ディスプレイの始まり。
ディスプレイの材料としては不安定で商用として問題あり
- 1973年：シャープより電卓(EL-805)の表示として世界で初めてLCDを応用。
- 1976年：グレイ教授(英国ハル大学)が安定な液晶材料(ビフェニール系)を発見。

液晶分子の配向と電界制御

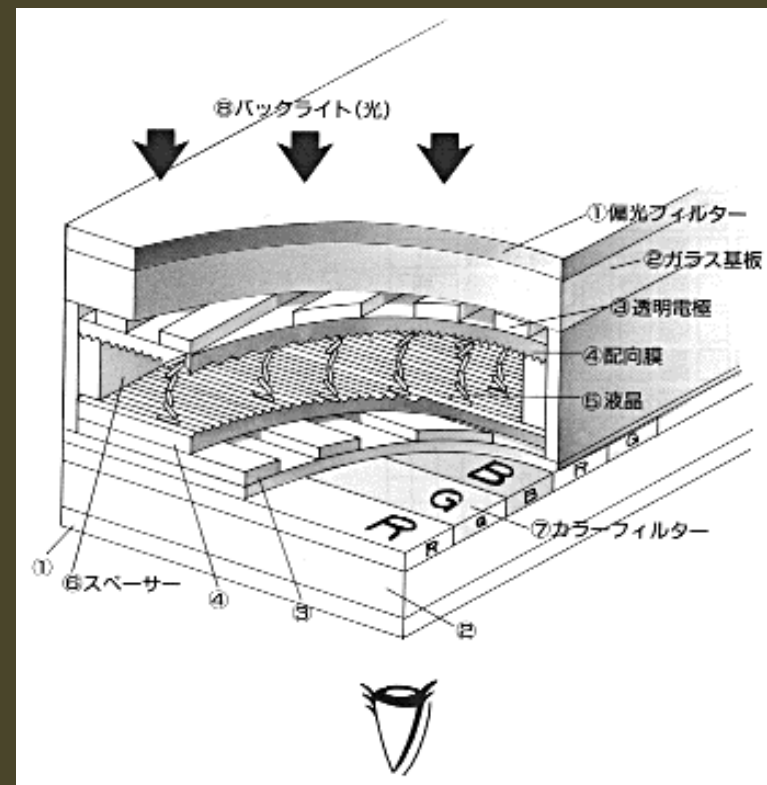
- 液晶分子の配向
 - 配向剤を塗布、ラビング。分子をラビング方向に配列
- 電界による配向制御(液晶分子は電気双極子)



液晶ディスプレイの構造

カラー液晶ディスプレイの構造は、構成要素が層状になっている。

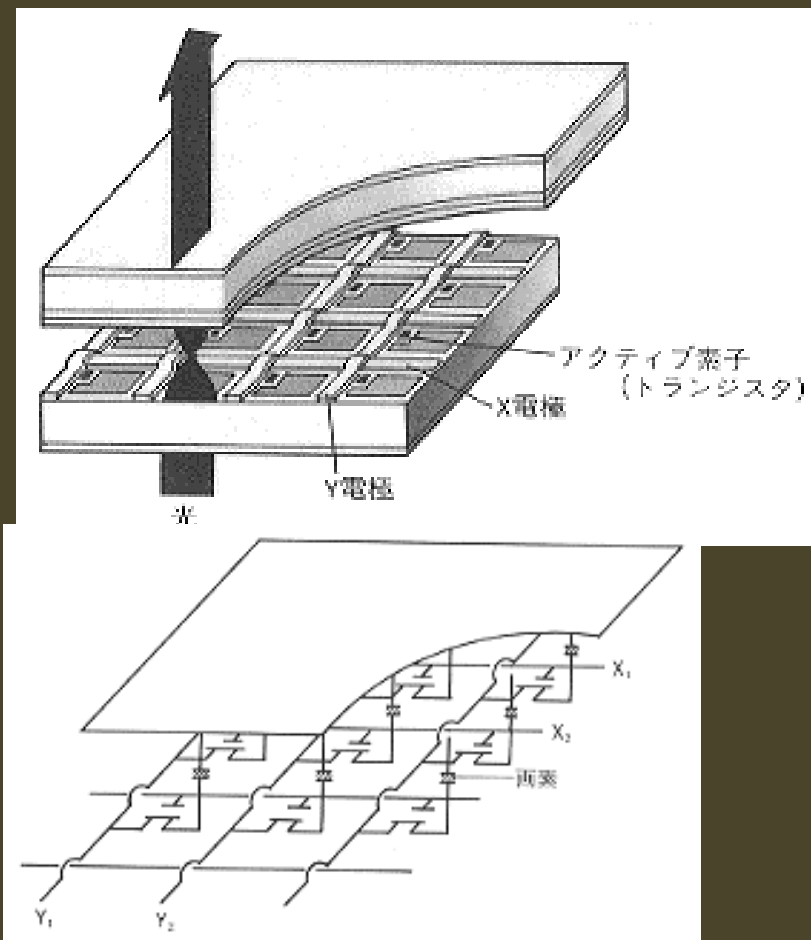
- 1ー偏光フィルター：偏光を選択する。
- 2ーガラス基板：電極部からの電気がほかの部分に漏れないようにする。
- 3ー透明電極：液晶ディスプレイを駆動するための電極。表示の妨げにならないよう透明度の高い材料を使う。
- 4ー配向膜：液晶の分子を一定方向に並べるための膜。
- 5ー液晶：ネマティック液晶
- 6ースペーサー：液晶をはさむ2枚のガラス基板間のスペースを均一に確保。
- 7ーカラーフィルター：白色光からR,G,Bを選択。



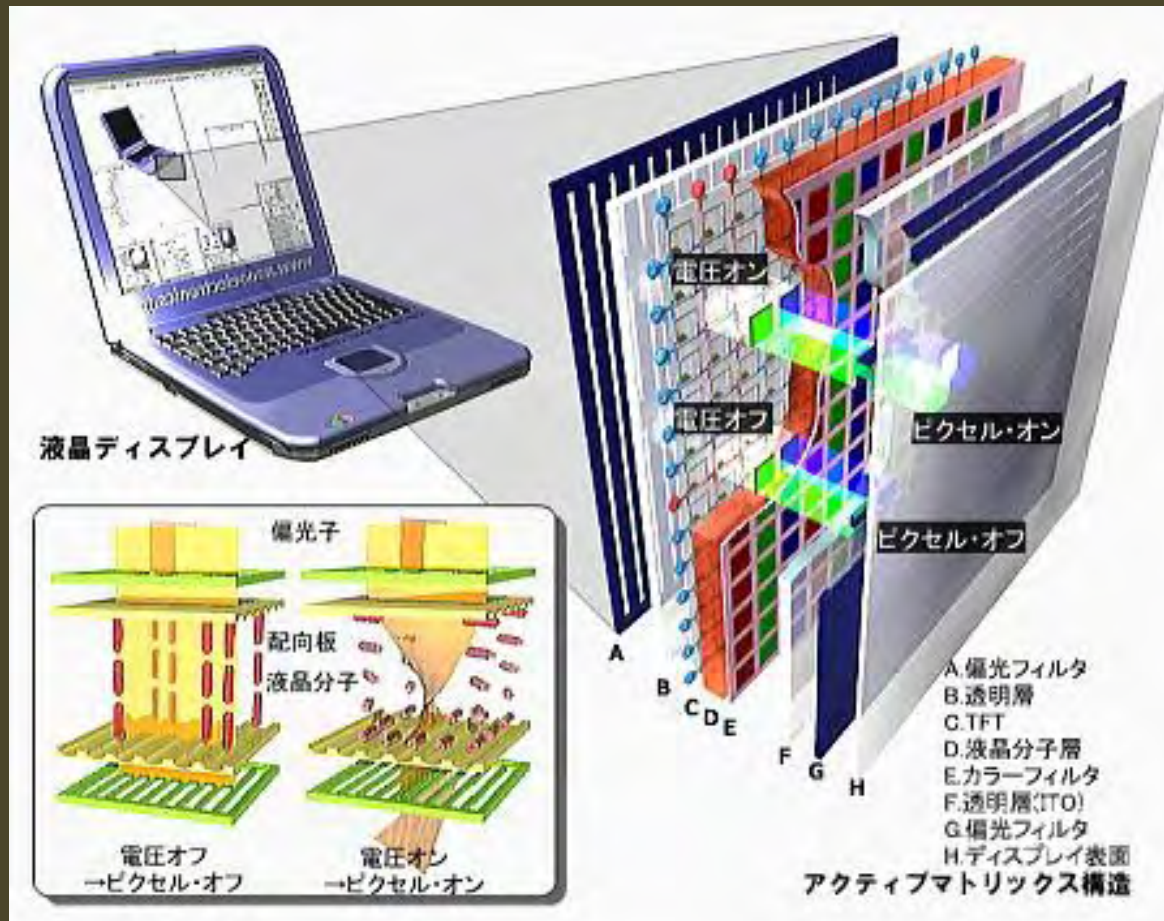
シャープのホームページより
http://www.sharp.co.jp/products/lcd/tech/s2_3.html#2

アクティブ・マトリクス

1. X電極が、各画素に付いたアクティブ素子をON/OFFする。
2. ON状態にあるアクティブ素子は、そのままの電圧を保ち、Y電極と通じることができる。
3. Y電極に電圧をかけ、ON状態にある目的の画素を点灯させる。



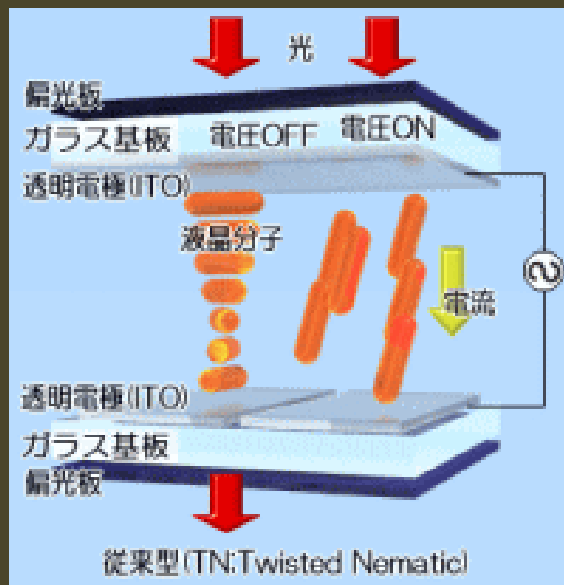
TFTアクティブマトリクスLCD



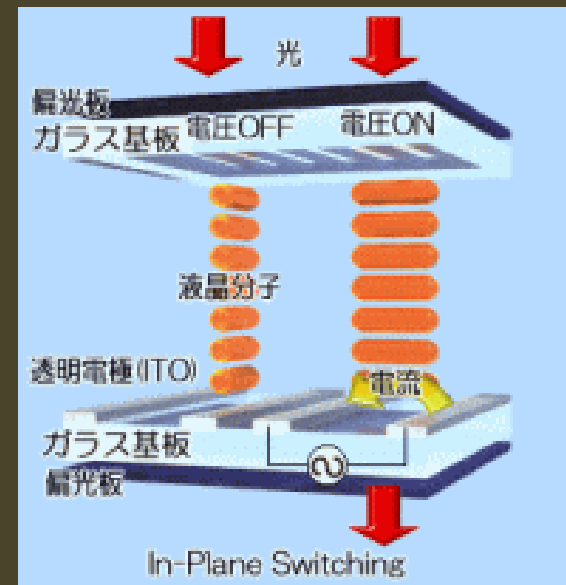
新しい液晶によるスイッチング

- IPS (in-plane switching)
面内でスイッチすることで視野角依存性を減らす

従来型



IPS型

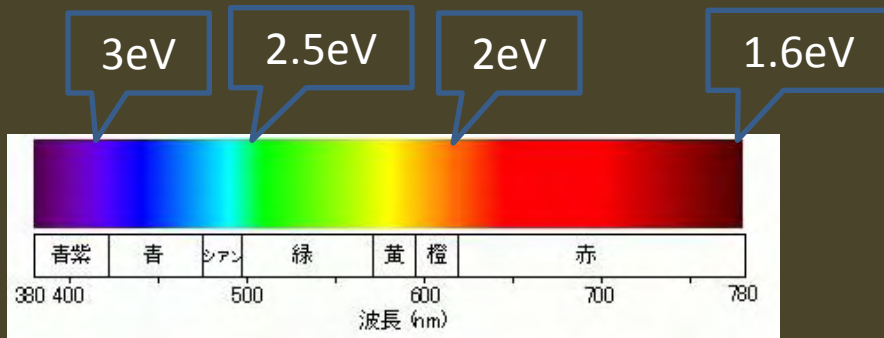




太陽電池のキホン

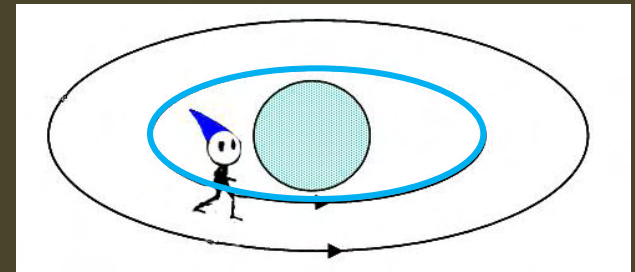
光はエネルギーの粒

- 光はエネルギーの粒です。この粒のことを光子といいます。光子は $E=h\nu$ で表されるエネルギーをもっています。
(h はプランク定数、 ν は光の振動数です)
- 光子のエネルギー E と波長 λ の関係は、 $\nu=c/\lambda$ を用い、 $E(\text{eV})=hc/\lambda=1239.8/\lambda(\text{nm})$ と表されます。
- 短い波長の光子は、長い波長の光よりエネルギーが高いのです。

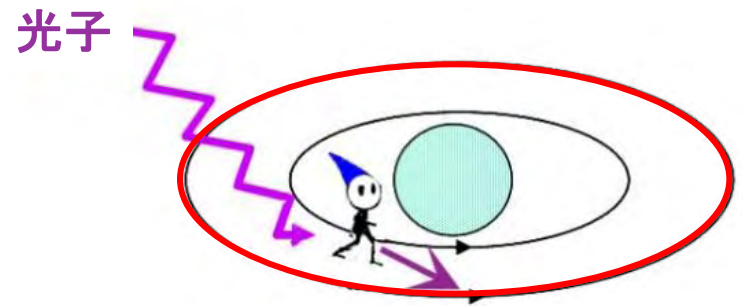


光吸収で物質中の電子のエネルギーが増加

- 物質が光子を吸収すると、物質中の電子は光子エネルギーをもらって、高いエネルギーの状態(励起状態)になります。
- この**電子のエネルギー**を何らかの方法で外に取り出せば、電気が起きます。

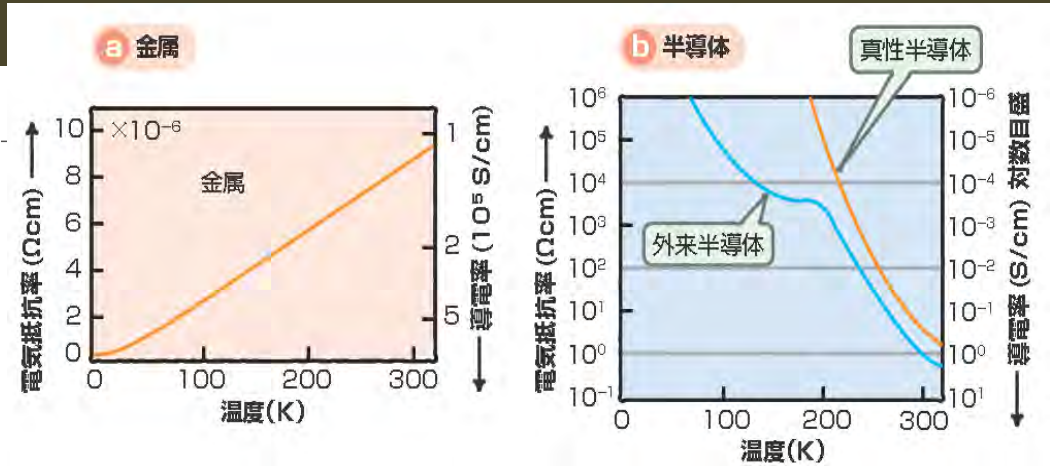
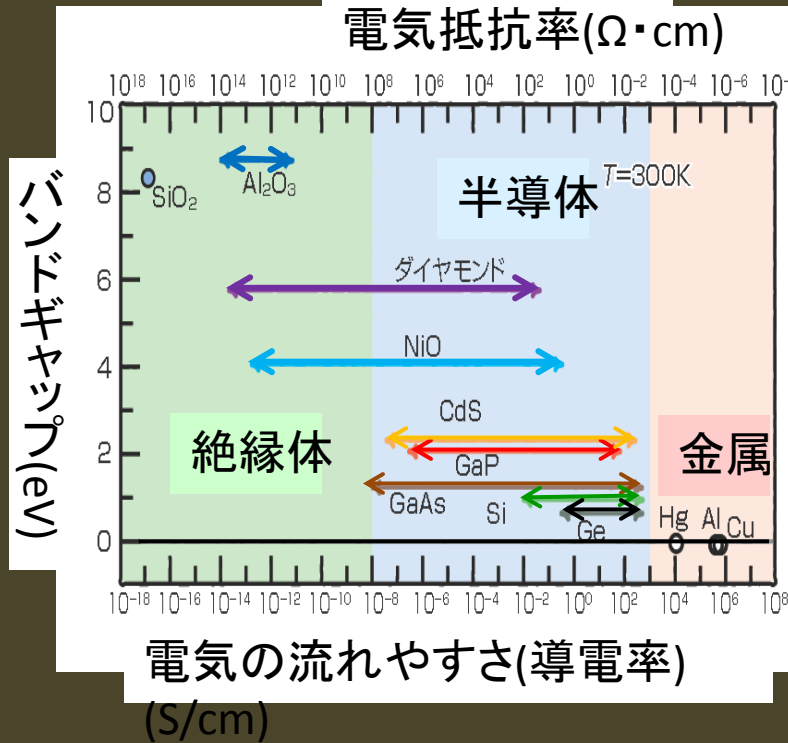


基底状態



励起状態

金属と半導体、何が違うの？



金属は温度を上げると電気抵抗が高く(電気が流れにくく)なるのに対し、半導体では温度を上げると電気抵抗が低く(電気が流れやすくなります)。

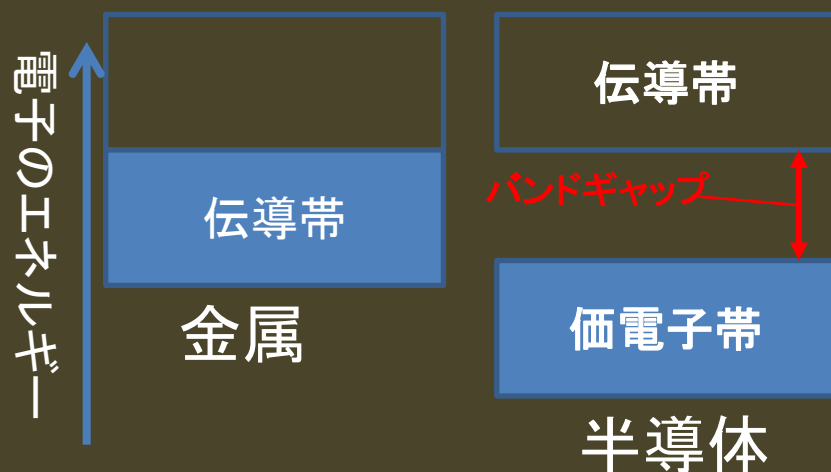
- 半導体は、電気の流れやすさ(導電率)が導体(金属)と不導体(絶縁体)との中間の物質です。
- 不純物を100億分の1以下しか含まない純粋の半導体は、絶縁物のように電気を通しません。
- 逆に、純粋の半導体に100ppm程度の不純物を加えるだけで、金属に近い導電率をもちます。

半導体の導電率はコントロールできる

- 純粋の半導体は、低温では絶縁体と同様電気をとおしません。
- 純粋の半導体に微量の元素を添加すると、元素の種類を変えることで電子が電流を運ぶn型、あるいは、ホール(電子の抜け孔)が電流を運ぶp型になって、電気を通すようになります。
- 添加元素のことをドーパントといいます。n型にするドーパントをドナーといい、p型にするものをアクセプターといいます。
- ドーパントの濃度を増やすと、導電率が増加します。1cm³あたり10¹⁸個を超えると金属のような電気特性になります。

半導体を特徴付けるバンドギャップ

- 半導体中の電子は、雲のように結晶全体に広がっていると考えられます。このとき、電子のエネルギーは幅をもち、エネルギーバンドと呼ばれる帯になります。
- 電子がもつことのできるエネルギーは、電子で満たされた価電子帯と、電子が空の伝導帯からなり、2つのバンドの間には、電子の占めることのできないバンドギャップがあります。金属にはバンドギャップがありません。

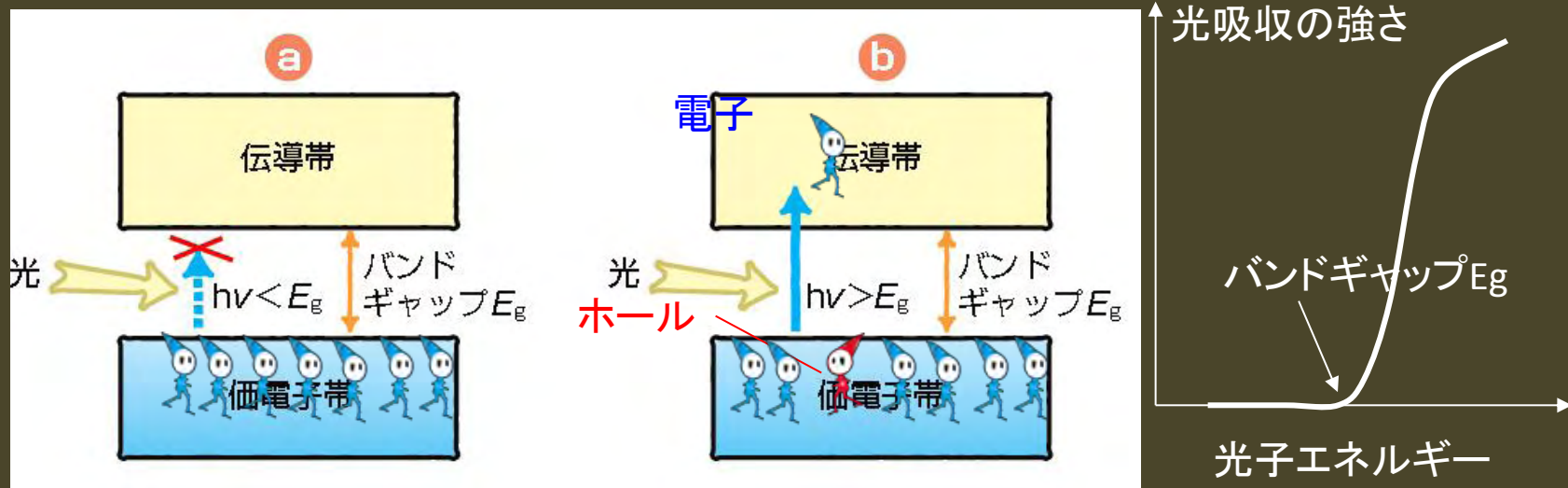


半導体	バンドギャップ
シリコン Si	1.1eV
ガリウムヒ素(GaAs)	1.5eV
ガリウムリン(GaP)	2.2eV
硫化亜鉛(ZnS)	3.5eV
窒化ガリウム(GaN)	3.4eV

半導体のバンドギャップと光吸収

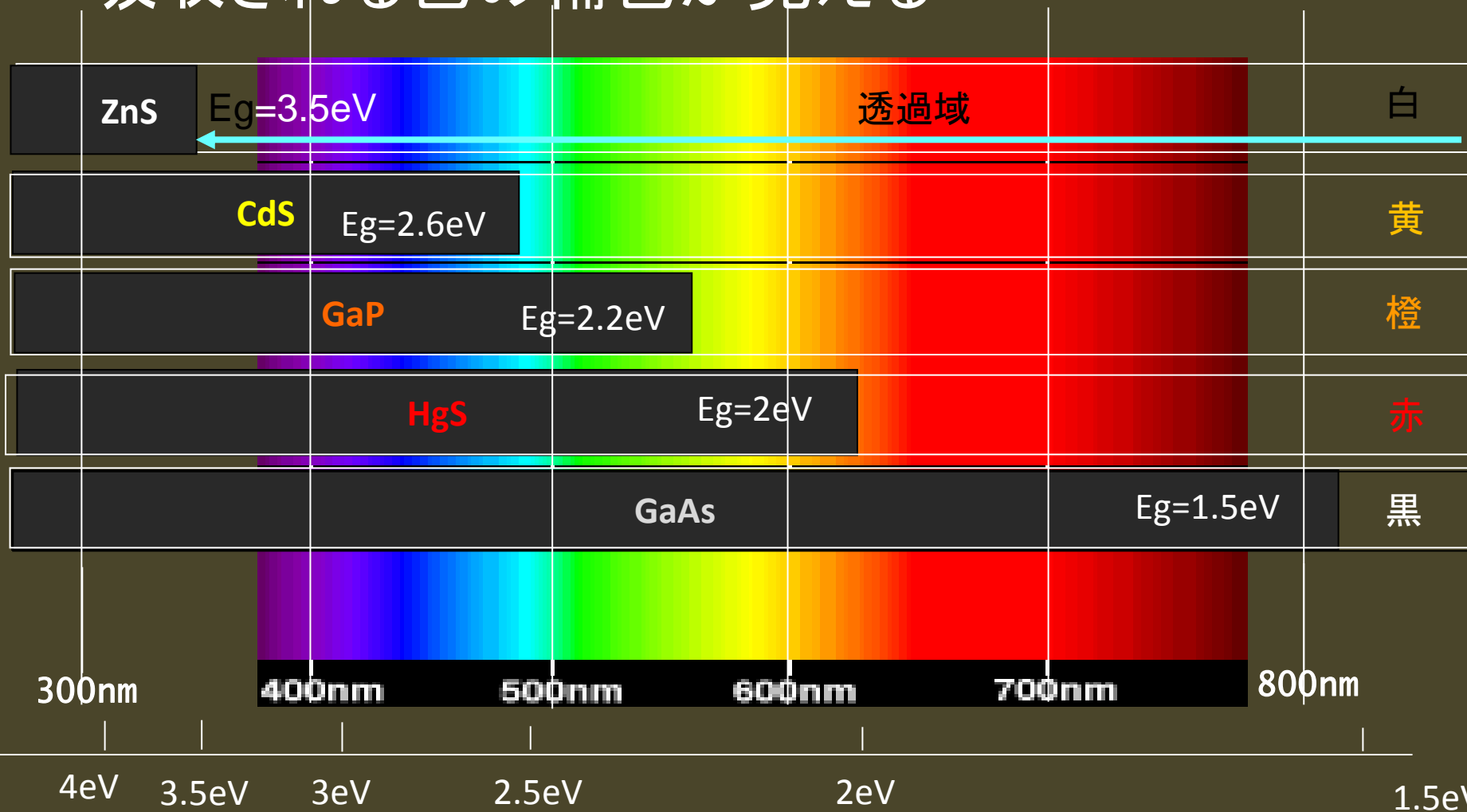
(a)のように、入射光の光子エネルギー($h\nu$)がバンドギャップ(E_g)より小さければ、価電子帯の電子は伝導帯に飛び移ることができず、半導体は光を吸収しません。

これに対して、(b)のように $h\nu$ が E_g より大きくなると、価電子帯の電子は光のエネルギーをもらって伝導帯に飛び移り、価電子帯にホールを残します。



半導体のバンドギャップと色(1)透過色

- 吸収される色の補色が見える

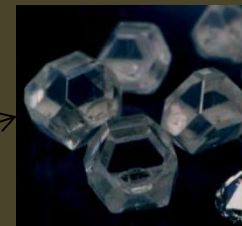


半導体のバンドギャップと色(2)結晶の色

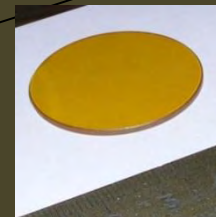
透過光の色

バンドギャップより低いエネルギーの光を全部通す

- $E_g > 3.3\text{eV}$: 無色透明
- $E_g = 2.6\text{eV}$: 黄色
- $E_g = 2.3\text{eV}$: 橙色
- $E_g = 2.0\text{eV}$: 赤色
- $E_g < 1.7\text{eV}$: 不透明



Diamond
6eV



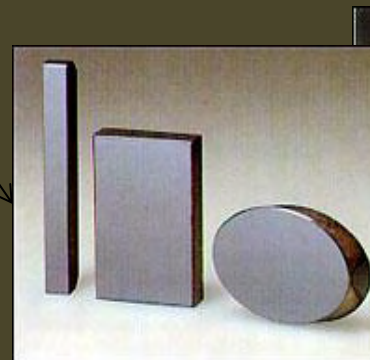
CdS
2.6eV



GaP
2.3eV



HgS
2.0eV



GaAs 1.5eV



Si 1.1eV



Ge 0.7eV

半導体のバンドギャップと色(3)絵の具の色

図は、いくつかの半導体についてバンドギャップと色の関係を示したものです。

- 硫化亜鉛 (ZnS) のバンドギャップは3.5eVなので、光学吸収端の波長354nmより短い光が吸収されそれより長い波長は全部透過します。このため、可視光のすべての波長が透過するので無色透明で、粉末は白です。
- 硫化カドミウム (CdS) では $E_g = 2.6\text{eV}$ に相当する波長477nmより短波長の紫と青が吸収され、赤から緑の波長が透過するので黄色です。
- リン化ガリウム (GaP) では、 $E_g = 2.2\text{eV}$ に相当する564nm(緑)より短い波長が吸収され、黄色と赤が透過するので橙だいたい色です。
- 硫化水銀 (HgS) は $E_g = 2\text{eV}$ に相当する620nm(赤橙)より短波長が吸収されて赤色です。
- ガリウムヒ素 (GaAs) は吸収端が826nmにあり、可視光(380~780nm)をすべて吸収するので、透過光は目に見えませんが色は黒です。

化学式	鉱物名	絵の具名	バンドギャップ (eV)	色
C	ダイヤモンド	—	5.4	無色
ZnO	紅亜鉛鉱	ジンクホワイト	3	無色
CdS	硫カドミウム鉱	カドミウムイエロー	2.6	黄
$\text{CdS}_{1-x}\text{Sex}$	—	カドミウムオレンジ	2.3	橙
HgS	辰砂	パーミリオン	2	赤
HgS	黒辰砂	—	1.6	黒
Si	—	—	1.1	黒
PdS	方鉛鉱	—	0.4	黒

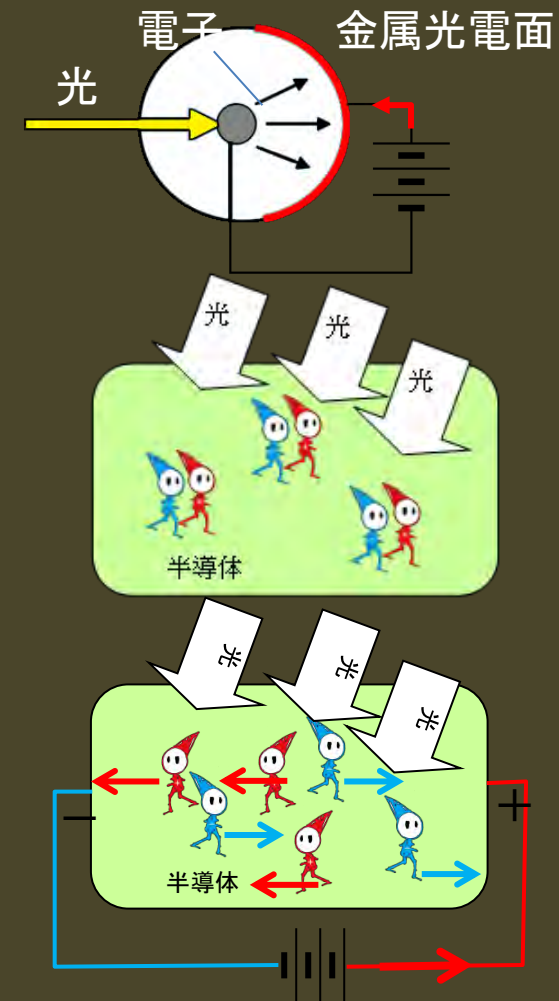


固体に光を照射しただけでは電力は得られない

金属に光を当てると外部光電効果が起こり真空中に電子が放出されますが、電圧を加えないと電流は流れません。発電には使えません。

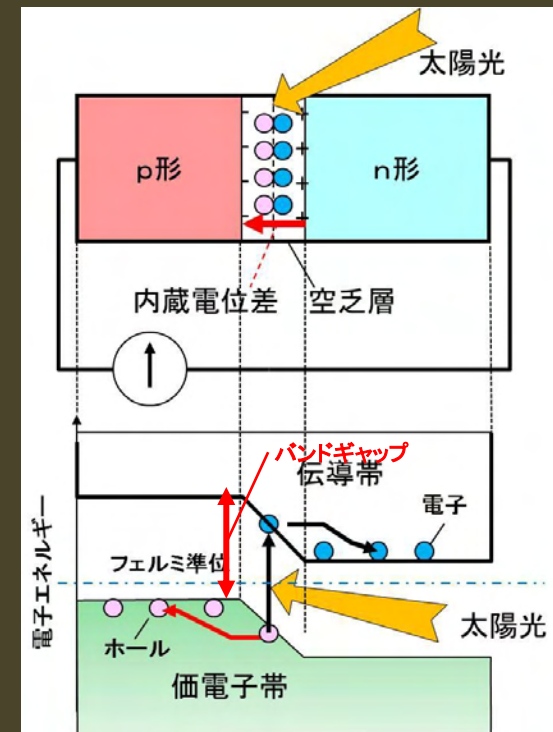
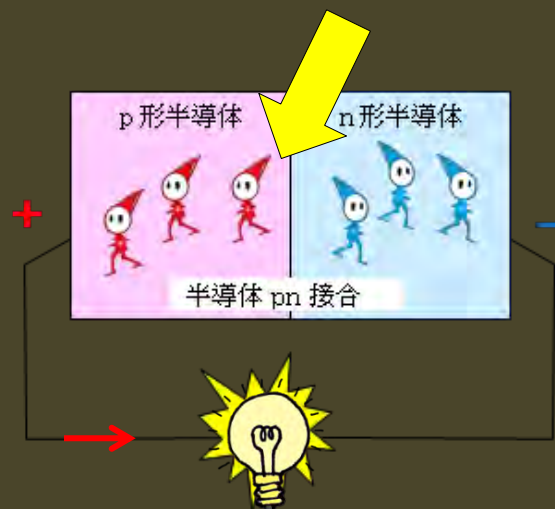
半導体に光をあてると、内部光電効果(光伝導)により電子とホールが生じます。電圧を加えると電気が流れます。これは光スイッチにつかえますが発電にはつかえません。

電力を取り出すには、半導体のpn接合ダイオードという仕掛けが必要です。



pn接合ダイオードという半導体のしかけを作って初めて、光起電力が得られます。

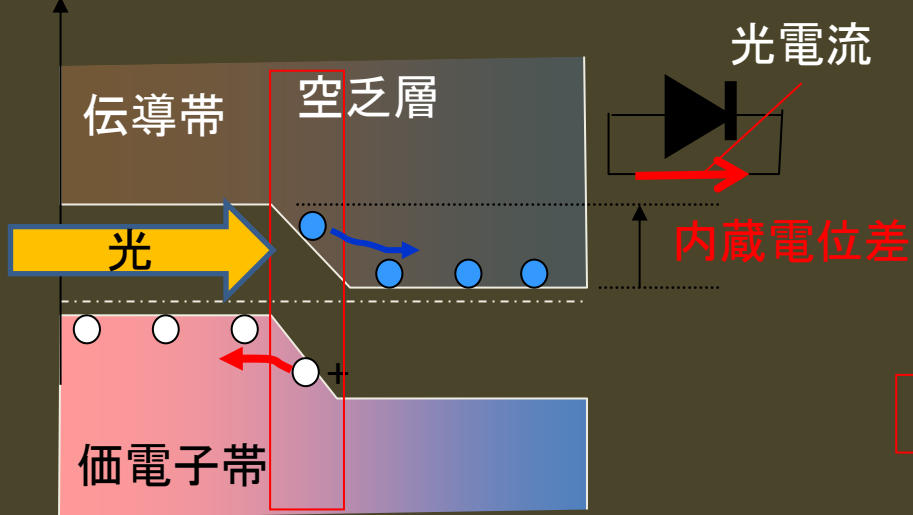
p形半導体とn形半導体の接合を作ると、接合界面付近に内蔵電位の勾配ができて電子とホールが分離され、光起電力が生じます。



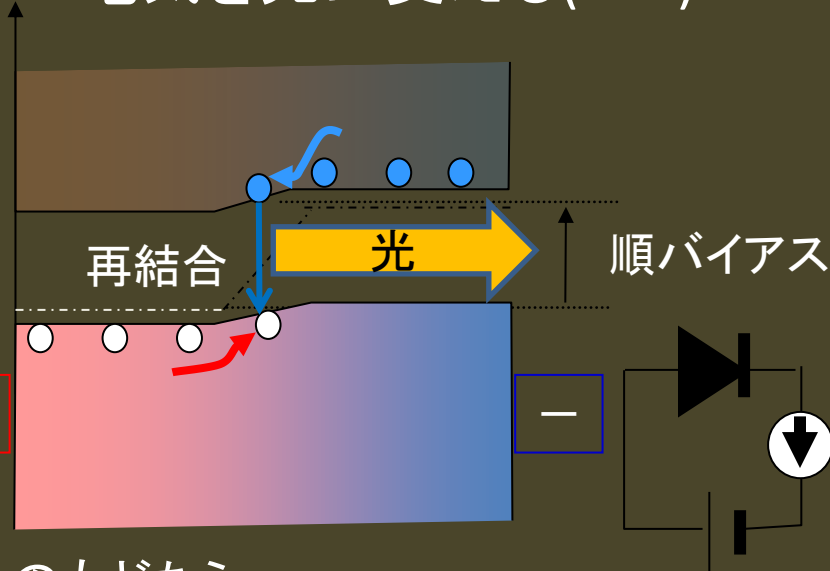
太陽光で発電するには半導体のしかけが必要です

参考

光を電気に変える(太陽電池)

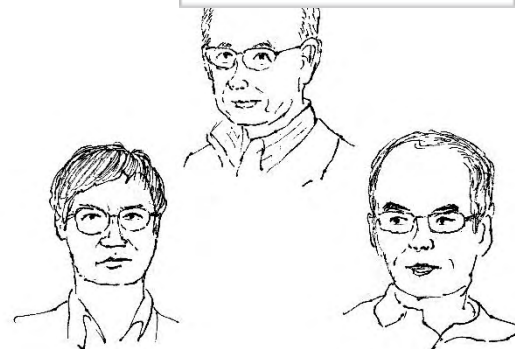
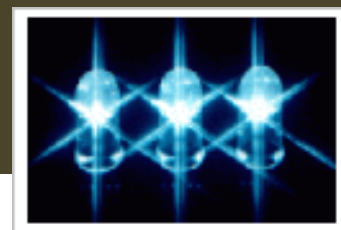


電気を光に変える(LED)



- 光を電気に変えるのも電気を光に変えるのもどちらもpn接合ダイオードの働きです
- 光で作った電子とホールを内蔵電位差(電位の坂道)で分離するのが太陽電池です。
- 順方向バイアスをかけて電子とホールを再結合させ、エネルギー差を光に変えるのが発光ダイオードです。

太陽電池と発光ダイオード



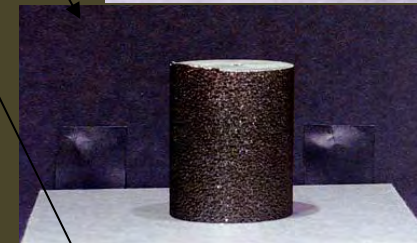
シリコン太陽電池ができるまで(1)

ケイ石から**金属シリコン**を得る

金属シリコンを高純度多結晶シリコンにする (eleven nine)

高純度多結晶シリコンの結晶を整え単結晶にする (インゴット)

単結晶 (インゴット) をスライスし、表面を磨くなどの処理をしウエハが完成する



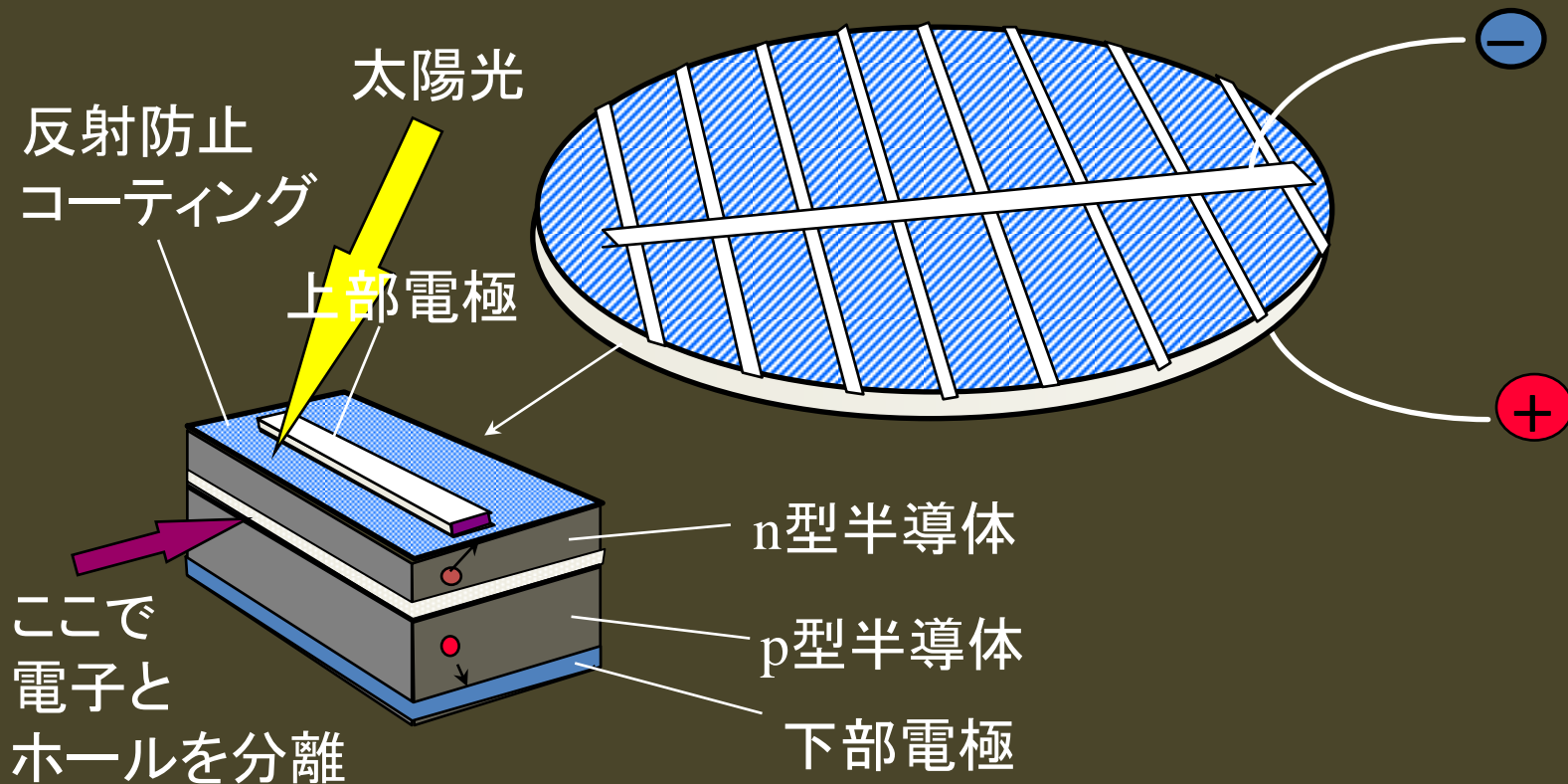
シリコン太陽電池ができるまで(2)

単結晶系：単結晶インゴットをワイヤソー cutter などでスライスしてウェハーに加工し、セル形成のプロセス（不純物の拡散によってpn接合を形成し、電極を形成するなど）に送ります。ウェハーの厚みは0.2mm程度です。

多結晶系：単結晶インゴットの両端部や切断くずを再融解して固化した多結晶インゴット（いわばシリコンの鋳物）をスライスしてウェハーに加工し、太陽電池セルに仕上げます。ウェハーの厚みは0.3mm程度です。



太陽電池の仕組み



セルからモジュールへ

ソーラーパネル(太陽電池モジュール)は、太陽電池セルの集積によってつくります。図には、多結晶シリコン太陽電池モジュールの製作過程を示しています。

セルを強化ガラス上に配列

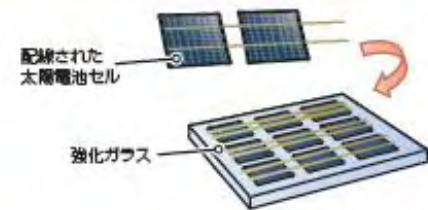
太陽電池セルは0.2~0.3mmの薄さですから、支えになるものがなければなりません。通常はガラス板を用います。まず、直列に配線された太陽電池セルの受光面をガラス側に向けて、ガラス板上に配列します。

樹脂と保護フィルムで封止

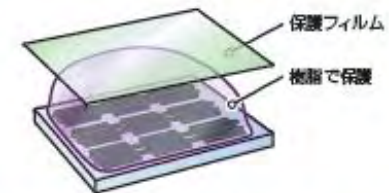
この上に樹脂を載せ、さらに保護フィルムで覆って、セルの配列を封止します。太陽電池セル自体の寿命はかなり長いのですが、封止に用いる樹脂の劣化が太陽電池モジュールの寿命を決めるといわれています。

フレームで覆って固定し、電極をつけて完成

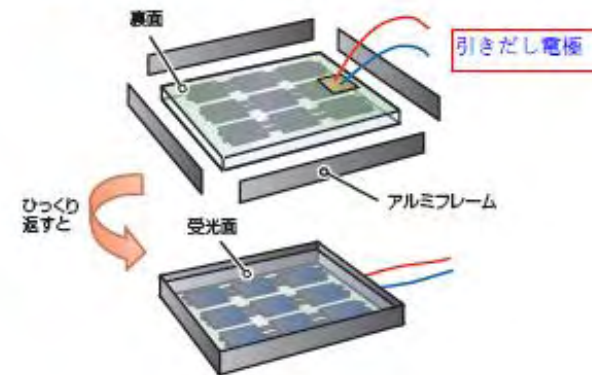
a 配線されたセルを、強化ガラス上に受光面を下にして配列



b セルの上に樹脂を載せ、保護フィルムで覆って封止



c フレームと電極をつけて太陽電池モジュールの完成



電気になるのは太陽光のパワーの何%？

太陽光のパワー($1\text{kW}/\text{m}^2 \times$ 受光面積)に対する太陽電池から取り出せる最大パワーの比率(百分率)を変換効率といいます。

- シリコン単結晶太陽電池の変換効率の最高値は小面積セルで25.0%(UNSW; 1cm^2)、大面積モジュールで22.7% HIT型で25.6%(Panasonic; 144cm^2) ← 2014.4.10
- ガリウムヒ素系多接合太陽電池の変換効率は小面積セルで44.4%(Sharp; 集光 0.16cm^2) ← 2013.6.14、35.8%(Sharp; 非集光) 大面積モジュールで36.1%
- CIGS系薄膜太陽電池の変換効率は小面積セルで20.9%(Solar Frontier)、サブモジュールで17.8%、大面積モジュールで13.6%

変換効率の定義

変換効率とは、太陽光のエネルギーを太陽電池から取りだせる電気エネルギーに変える能力を表すための尺度です。

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、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。

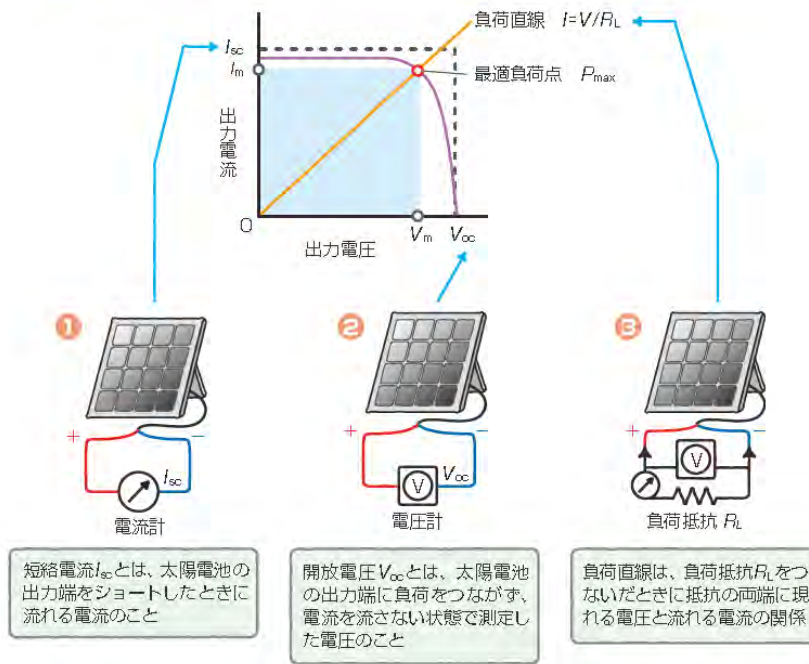
取りだせる電力は、実際の電圧－電流関係が曲線状になっているので、点線で示した長方形の面積 $V_{OC} \times I_{SC}$ より小さな電力しか取りだせません。

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。

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（ $1\text{kW}/\text{m}^2$ と受光面積の積）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 です。

図1 太陽電池の電圧－電流特性



変換効率には理論的に限界がある

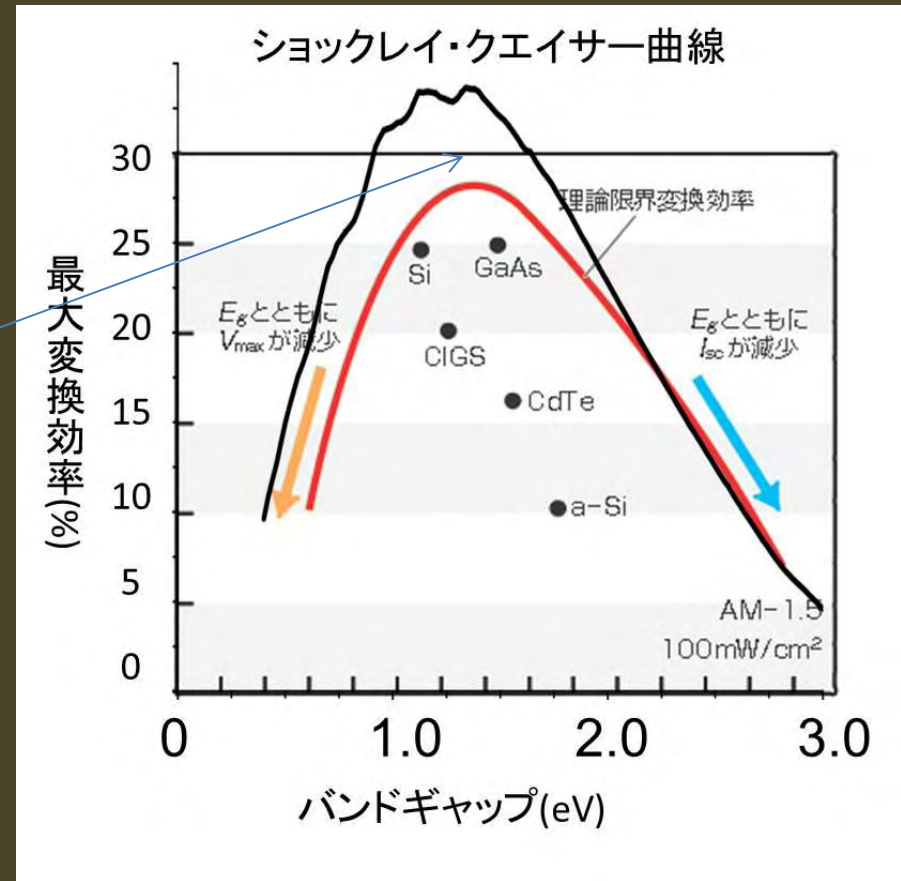
理論的に予測できる太陽電池の最大の変換効率(25°C)をバンドギャップ E_g の関数として表した曲線を「理論限界変換効率曲線」といいます。

E_g の低い側では、 E_g が下がると V_{max} が低下します。 E_g の高い側では、 E_g とともに I_{sc} が低下します。それで、理論限界変換効率は $E_g=1.4\text{eV}$ 付近で最大値30%をとります。

逆に言えば、pn接合1個の変換効率は、せいぜい30%しかありません。

シリコンの限界値は27%ですが、実現されている最大値は25%なので、ほとんど限界までできていることがわかります。

一方、CIGSで実現している変換効率の最大値は20%だが、研究開発によって28%くらいまで改善できる余地があります。



太陽電池の比較

表1 太陽電池の比較

材料による分類	小分類	現状の変換効率(%)**		モジュールコスト***	資源	特徴
		モジュール	セル			
シリコン系	単結晶系	22.9	25.0	1.1	△	高い変換効率。安定。Si材料の多消費に難
	多結晶系	19.5	20.4	1.08	△	比較的高効率、普及。材料供給に難
	薄膜系	8.2	10.8	0.84	○	低コストで大面積可能。省資源。低効率と光劣化に難
化合物半導体系	Ⅲ-V族	38.5	44.4	集光	△	超高効率。宇宙用。高コスト、資源問題に難
	CIGS系	17.8	21.7	(0.99)*	○	低コストで大面積可能。省資源。大面積効率に難
	CdTe系	16.1	21.5	0.98+	△	低コスト、大量生産。中効率。Cd使用が問題
化学系	色素増感系	8.9	11.9	(0.75-3.3)*	○	低コスト、省資源。中効率。液体使用が難。光劣化も
	有機半導体系	6.8	10.7	2.84)*	○	低コスト、省資源。中効率
	有機無機ペロブスカイト		20.1		○	

表1はさまざまな材料の太陽電池のセル効率およびモジュール効率、コスト、材料に関連する資源問題と毒性、各電池の特徴をまとめたものです。

多結晶シリコンのモジュールは、かなりの高効率でコストも低く、長い伝統に支えられて性能も安定しています。これまでの普及型の家庭用太陽電池モジュールは、ほとんどこのタイプでした。

* 2010年12月の最低価格(<http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm>)
 & 2008年: Nanosolar社の発表(rlc-to-rlc)
 + 2009年: First Solar社発表

Estimation: Joseph Kalowekamo, Erin Baker: Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells; Solar Energy 83, 1224-1231 (2009)

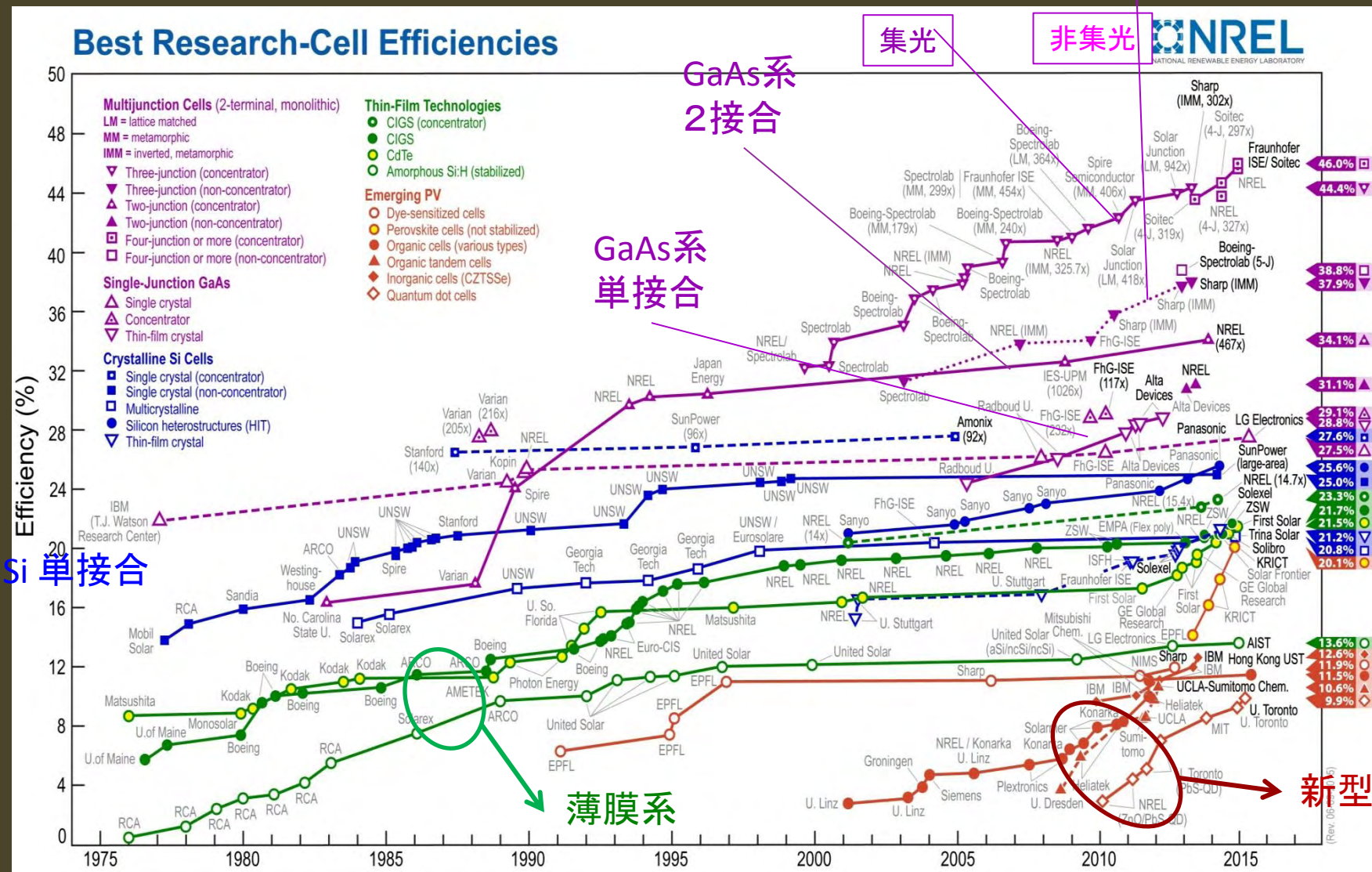
** M.Green et al., Solr cell Efficiency tables (version 43)
 Prog Photovolt. ReAppl. 2014 22, 1-9s.

*** ビークパワー 1Wあたりのモジュールコストを米ドルで表したもの

種々の太陽電池のセル変換効率・モジュール変換効率のチャンピオンデータ(2010年時点)および記載のあるモジュールコスト***の一覧表

最高変換効率の変遷

GaAs系3接合



セル・モジュール・アレイ

セルの電圧(開放電圧)は半導体によって決まっています、乾電池の電圧より低い1V足らず、Si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にすると出力電圧は約21Vになります。

このモジュールを7個直列につないだモジュール列の電圧は150Vとなり、電灯線の電圧と同レベルになります。

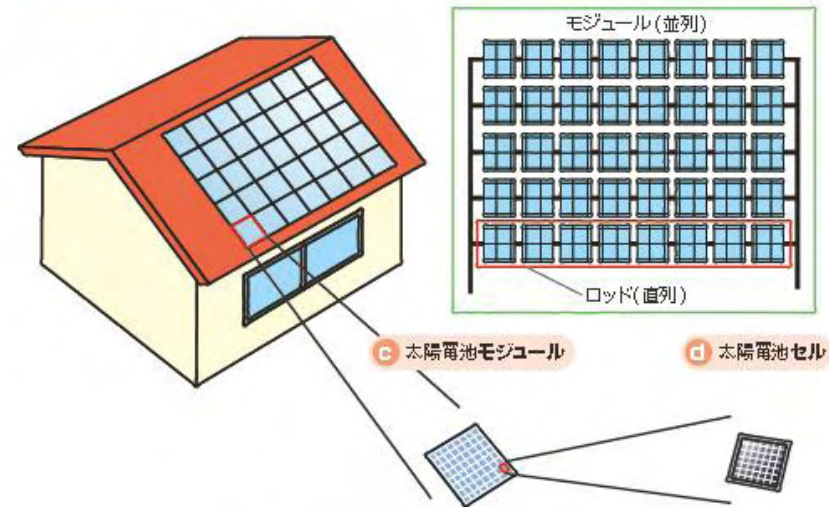
また、1辺10cmの正方形セルを流れる電流は、せいぜい4Aですが、5つのモジュール列を並列にすれば20A流せます。

7直列5並列のアレイにすることで、150V、20Aすなわち約3kWの太陽電池発電機になるのです。

図1 太陽電池モジュールと太陽電池アレイ

a 太陽電池アレイ

b 太陽電池アレイの配線列(7直列5並列)



太陽電池セルを直列につないだものがモジュール、
モジュールを直並列につないだものがアレイ



実際のモジュールの変換効率

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でしたら、受けた光の13~15%くらいしか電気に変わっていません。

結晶シリコン基板上に薄膜アモルファスシリコン形成したハイブリッド型のHIT太陽電池モジュールの出力は1m²あたりに直すと152Wもあります。

セル効率からの低下の原因は、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うこと、などです。



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太陽電池の変換効率は35%という高い値でした。

建材としての太陽電池(1)

- 屋根に設置する太陽電池パネル(モジュール)は、その設置方法によって、図1に示すように、大きく分けて屋根置き型と屋根建材型の2つに分類することができます。

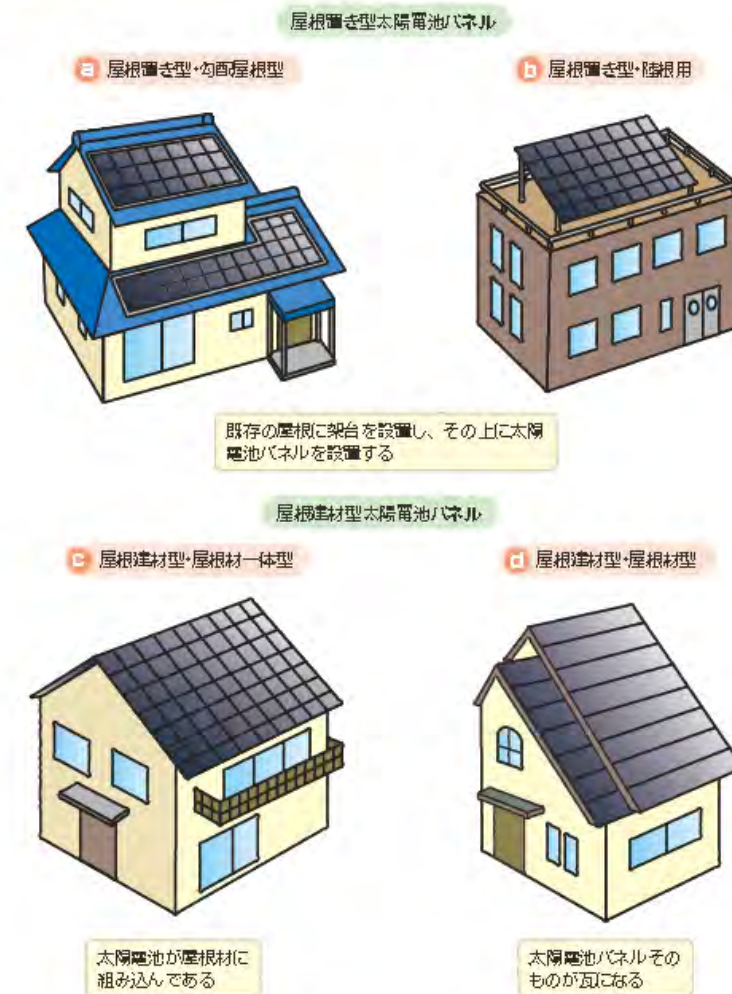
屋根置き型

- 屋根置き型は、既存の屋根に太陽電池パネルを追加して設置するタイプで、これにも、勾配屋根の瓦の上に枠型の架台を置いてパネルを設置するものと、陸屋根(フラットな屋根)の屋上に傾斜架台を置いてパネルを設置するものの2種類があります。どちらの場合にも、標準的な太陽電池パネルを用いることができます。架台の設置が太陽電池設置のコストを増やす原因になるほか、既存住宅の耐重量工事が必要になる場合があります。また、屋根置き型・陸根用の場合、強風対策が重要です。

屋根建材型

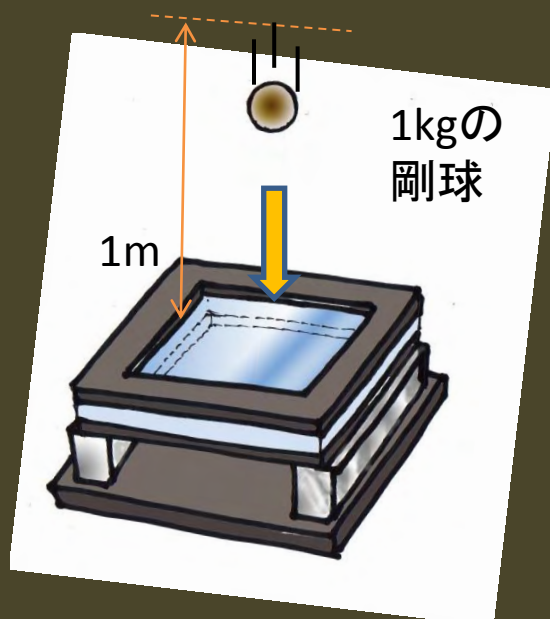
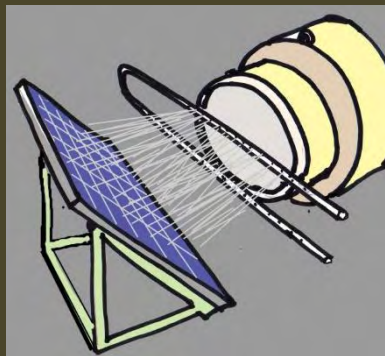
- 新設住宅の場合には、瓦の代わりに(b)に示すような防火性能と屋根材機能をもたせた屋根建材型パネルを設置できるので、瓦を葺くためのコストが不要になりますし、架台の重量の問題も回避できます。屋根建材型にも、太陽電池を屋根材に組み込む屋根材一体型と、太陽電池自体が屋根材となる屋根材型(瓦型太陽電池モジュール)があります。
- 壁に設置する太陽電池パネルにおいても、屋根と同様に、壁設置型(壁に架台を取りつけてパネルを設置)と壁建材型(太陽電池が壁建材となる)の2種類があります。

図1 太陽電池モジュールと設置方法



建材としての太陽電池(2)

30m/sの強風下での散水テスト



太陽電池の上を人が歩く

太陽電池パネルは建材

- 建材型太陽電池パネルは瓦の代わりに葺くことができるので、瓦を葺くためのコストが不要となりますし、架台の重量の問題も回避できます。しかし実際には、瓦に代わる建材として建築基準法に合致する防水・防火・強度の要求を満たしていることが求められます。

防水機能

- 建材一体型パネルは、屋根瓦と同等の防水機能が要求されます。屋根板の上に防水シートを貼り、レールを敷いてパネルの外枠を固定しますが、レール側面の防水のほか、パネル間の目地のシールが必要です。図1のように、台風を想定して、風速30m/s、散水量240mm/hの散水試験に耐える防水機能と排水機能がテストされます。

防火機能

- モジュールはセルをガラスに貼りつけ、樹脂でシールした上にフィルムでカバーしますが、近隣火災の場合にフィルムが燃えたり、高温で融解したりして野地板に着火することを防ぐために、難燃性のフッ素樹脂系フィルムを使ったり、鋼板を組み合わせたたりして防火機能を高めています。

強度

- パネルには強化ガラスが使われますが、JIS R 3206-2003に従って、約1kgの剛球を高さ100cmから落とす落球テストに合格する強度が求められます。パネル上を人が歩いて設置工事を行いますから、人が乗って歩けるのに十分な強度が保証されていなければなりません。

おわりに

- この講義では、暮らしの中の光と色と題して、光デバイスが身の回りの生活に深く関わっていることを学びました。
- LED, 液晶ディスプレイ、太陽電池、光通信、光ディスクのいずれにおいても、材料およびデバイス技術が重要な役割を担っていることを学びました。
- この講義が光と色の科学技術について考える機会になることを願っています。