

第 153 回 CIS パートナー会議事録(一般様用)

開催日時 2025 年 3 月 30 日 (日) 13 時~16 時

講師 久米 健次 様

テーマ 「太陽電池」

(時間があれば「Young の干渉実験再訪」)



会議風景

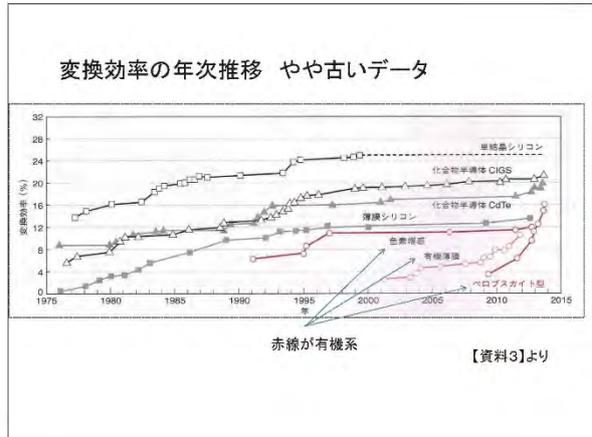


会議風景

1) 「太陽電池」

太陽電池

2025年3月30日
久米

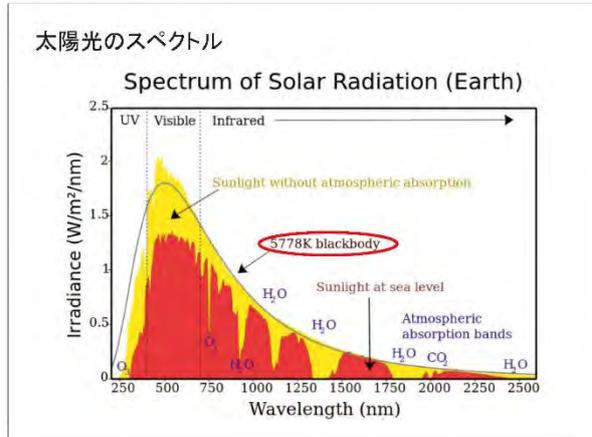
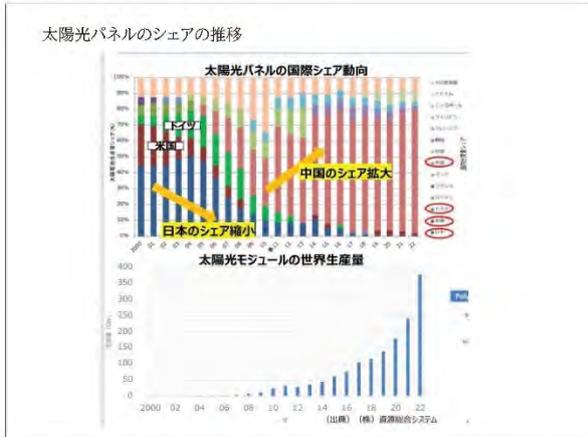


・太陽電池
シリコン系太陽電池の生産は中国が圧倒的なシェア
ペロブスカイト太陽電池で巻き返しを図る

シリコン系の太陽電池とペロブスカイト型太陽電池の概要

目次

- ・太陽光のエネルギー
- ・普及しているシリコン系太陽電池
- ・有機系の太陽電池
特にペロブスカイト太陽電池



次世代型太陽電池戦略 (令和6年11月)
次世代型太陽電池の導入拡大及び産業競争力強化に向けた官民協議会
次世代太陽電池について

- 現在、主流のシリコン太陽電池が市場の95%を占める。
- シリコン太陽電池以外の様々なタイプの太陽電池が開発されているが、特に、ペロブスカイト太陽電池は、直近10年間で変換効率が約1.5倍に向上。タンデム型までを視野に入れ、各国で事業化を目指す動きが見られる等、社会実装が近い次世代型太陽電池として期待されている。

10

太陽と地球の距離 光速で500秒
太陽の出力 $3.8 \times 10^{26} \text{W}$

大気の吸収を無視して 地表 1.3kW/m^2

太陽電池には様々なタイプがあるが、すべて「内部光電効果」で光エネルギーを電子のエネルギーに変換することで発電。

・シリコン系の太陽電池
「半導体のpn接合による内部電界」

12族	13族	14族	15族	16族
II族	III族	IV族	V族	VI族
	B ホウ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素
	Al アルミニウム	Si ケイ素	P リン	S 硫黄
Zn 亜鉛	Ga ガリウム	Ge ゲルマニウム	As 砒素	Se セレン
Cd カドミウム	In インジウム	Sn 錫	Sb アンチモン	Te テルル
Hg 水銀	Tl タリウム	Pb 鉛	Bi ビスマス	Po ポロニウム

化合物半導体:
III-V族、II-VI族

シリコン結晶

不純物のドナー準位

Li	Sb	P	As	Bi	Te	Ti	Se	K	S	Mn	Cr	Ag	Cd	Fe	Au	Cu	O
33	39	45	54	68	140	210	250	260	260	430	410	360	200	140	160	380	510

単位はmeV 室温は約26meV

Si $E_g = 1.12\text{eV}$

室温

キャリア密度 = 状態密度 × フェルミ・ディラック分布

真性半導体

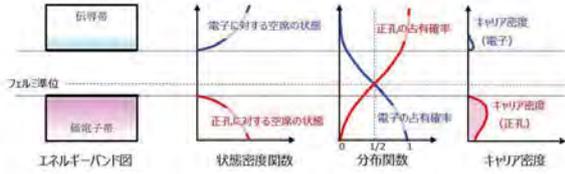
半導体とバンドギャップ

	Si	GaAs	GaN	Hexagonal 4H-SiC	ダイヤモンド
バンドギャップ (eV)	1.12	1.43	3.39	3.26	5.47
絶縁破壊電圧 (V/cm)	3.0×10^5	4.0×10^5	3.3×10^6	2.8×10^6	1.0×10^7
熱伝導率 (W/cm \cdot K)	1.5	0.5	1.3	4.9	20

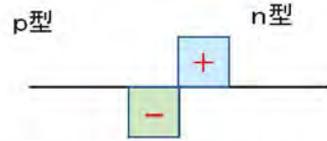
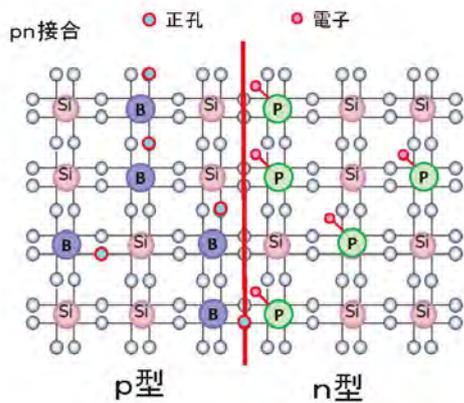
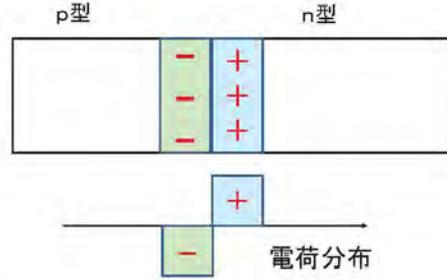
光子のエネルギー[eV] = $1240 / \lambda[\text{nm}]$
 波長 650nm \Leftrightarrow 1.91eV
 *) Al₂O₃(サファイア) 約8eV \Leftrightarrow 155nm

n型半導体のキャリア密度

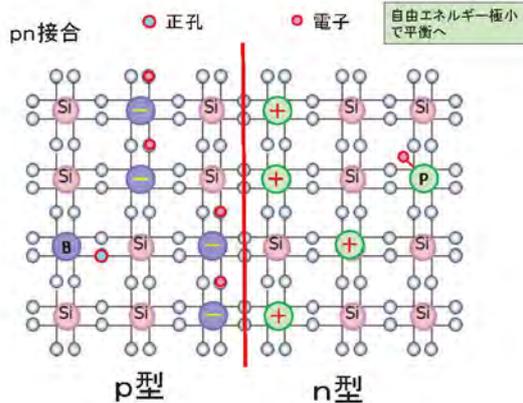
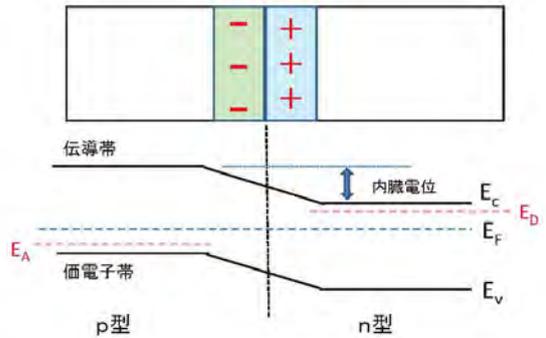
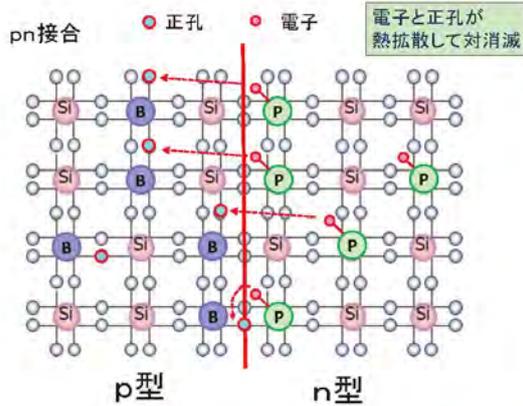
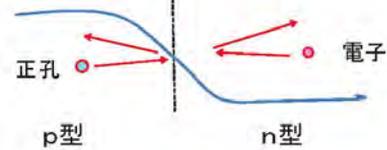
p型半導体のキャリア密度



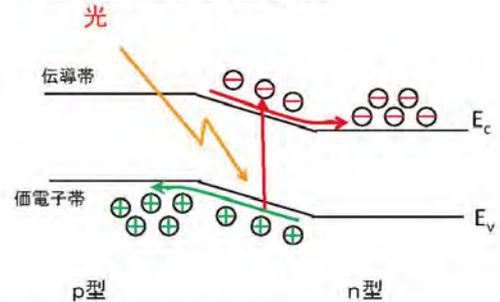
pn接合面に荷電2重層ができる。



この電荷分布による、電子の位置エネルギー
正孔は符号が逆



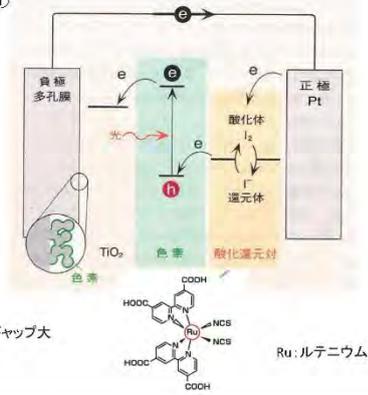
pn接続型太陽電池の起電力発生



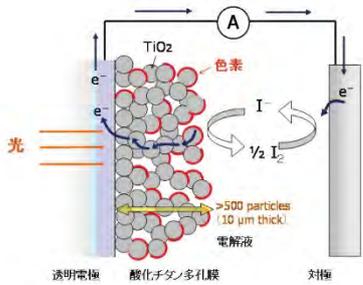
・実際には、p型領域やn型領域でも内部光効果は生じる。
・空乏層近くでは、生じた電子・正孔対は拡散して電流に寄与

有機系太陽電池

色素増感太陽電池①



色素増感太陽電池②



1991年 グレツェル

色素増感太陽電池の変換効率を飛躍的に向上させた

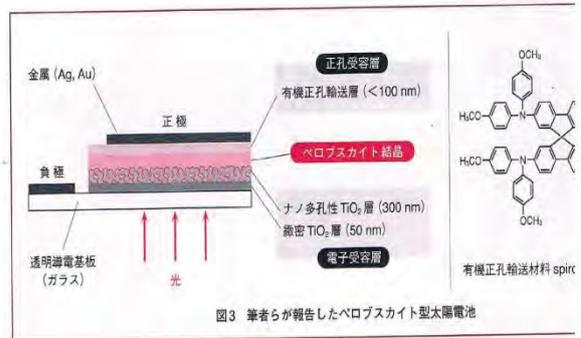
- ・酸化チタンを多孔質にし、吸着させる色素量を 800~1000 倍に引き上げた。
- ・色素のエネルギー準位を、吸着させる酸化チタンに適したエネルギー分布と空間分布に制御

ペロブスカイト太陽電池

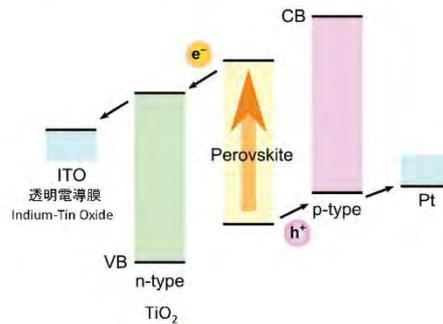
ペロブスカイト結晶: 中心に金属



a) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ (X = Cl, Br, I) 結晶は、有機基 CH_3NH_3^+ 、金属 Pb^{2+} 、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 、 Cl^- (110) 面。電荷は金属原子が配列する (110) 面に沿って伝播する。
図2 有機無機ハイブリッドのペロブスカイト結晶の構造



ペロブスカイト太陽電池によるエネルギーのとり出し



宮坂力氏らが2009年に $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ (X=Br,I) を無機光増感剤として色素増感太陽電池を作成することに成功。

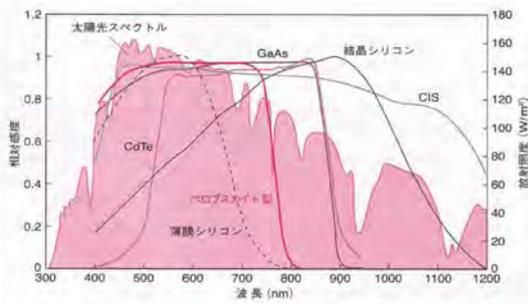
次いで、Parkらは $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ を用いて、6.5%の電力変換効率を報告。

当時のペロブスカイト太陽電池は、色素増感太陽電池の色素をペロブスカイトに置き換えたものだった。色素増感太陽電池では、色素増感太陽電池は色素が液体電解質と接していて、有機ハライドペロブスカイトが溶解してしまうため、太陽電池の安定性に問題があった。

その後、この不安定性は、液体電解質を固体の伝導体に代えることで解消された。

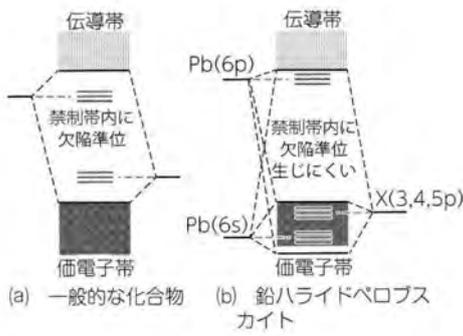
- $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2$ などのハライドペロブスカイトは可視光吸収に適したバンドギャップを持ち、さらに電子と正孔を引き離しやすい状態にある。
- 電子と正孔の移動に適した電子構造で、生成した電荷を効率的に分離可能。
- 現在主流のシリコン太陽電池では、高純度の結晶で欠陥の影響を最小限に抑える。一方、ハライドペロブスカイトは低温で作製しても欠陥が少なく、結晶性の良い試料が得られる。
- 欠陥ができた場合でも、電子や正孔の再結合の中心にはなりにくい。

	結晶シリコン	ペロブスカイト
発電性能 (高照度)	○20%超え	○20%超え
発電性能 (低照度)	×ほとんど発電しない	○よく発電する
重量	×重い	○軽い
薄さ (発電層)	△数百 μm オーダー	○軽い
柔軟さ	×ない	○フィルムで可能
原料・生産コスト	○量産効果で安い	○安くなる可能性大
輸送・設置コスト	△ある程度安い	○軽いので安い
耐久性	○高い	△技術開発中
大面積化	△容易	△技術開発中



(参考) ペロブスカイト太陽電池の種類

フィルム型	ガラス型	タンデム型 (ガラス)
<p>(出典) 積水化学工業 (株)</p>	<p>(出典) パナソニックHD(株)</p>	<p>(出典) 旭化成</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 軽量で柔軟という特徴を有し、建物屋面上、これまで設置が困難であった場所にも導入が可能で、新たな導入系テナシヤルの可能性大。 ○ 海外勢に、大型化・耐久性といった製品化の可否となる競争で、大まくり。 △ 発電コストの低下に向けては、引き続き、耐久性の向上に係る技術開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 建物建材の一部として、既存の高層ビルや住宅の窓ガラスの代替設置が期待され、一定の新たな導入系テナシヤルの可能性に期待。 △ 海外勢でも技術開発が盛んに行われており、競争が激化してきている状況にある。 ○ フィルム型と比べ、耐久性が高く、耐久性を確保しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 現在一般的に着目しているシリコン太陽電池の置換えが期待されており、引き続き研究開発投資、世界的に巨大な市場が見込まれる。 △ 海外勢でも技術開発が盛んに行われており、競争が激化してきている状況にある。 △ 開発の進捗状況は、フィルム型やガラス型に劣り、引き続き研究開発投資。 × シリコンは海外に依存。



ペロブスカイト太陽電池の位置づけ②

- ペロブスカイト太陽電池の発電層において主要となる**原材料のヨウ素について、日本は世界第2位の産出量 (シェア約30%)**。
- **原材料を含め強靱なサプライチェーン構築を通じ、エネルギーの安定供給にも資することが期待される。**

【ヨウ素の国際シェア】

(千トン)でヨウ素の産出量が大きく、製造している様子

【ペロブスカイト太陽電池のサプライチェーン】

16

- 単接合型ペロブスカイト電池は、比較的単純な方法、低純度の材料で比較的高い変換効率を得られる。
 - ペロブスカイトの化学組成および構造を変更して、材料のバンドギャップを調整できる。
 - ペロブスカイトは、大きなバンドギャップをもつ他の材料よりも安価。日本のヨウ素生産量は世界2位
- 課題
- 単接合型で26%超の電力変換効率を得るためには、非放射性的な再結合を抑制する改善
 - デバイスの長期耐久性の改善
湿度の高い雰囲気における安定性
 - 発電効率を落とさないPbフリー化

参考資料

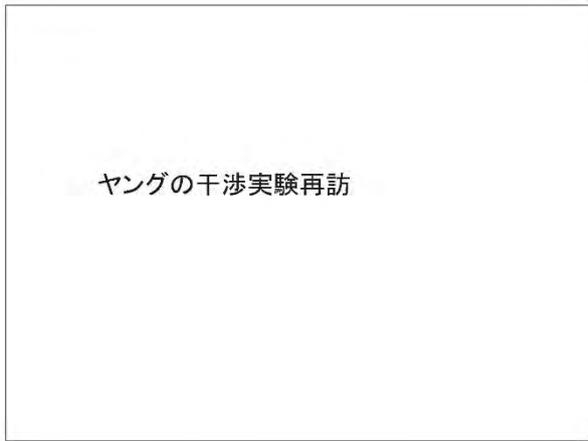
- 【1】次世代型太陽電池戦略 (2024年11月)
次世代型太陽電池の導入拡大及び産業競争力強化に向けた官民協議会
- 【2】「太陽電池はどのように発明され、成長したのか：太陽電池開発の歴史」
桑野幸徳著；日本太陽エネルギー学会編
- 【3】ペロブスカイト型太陽電池の登場
色素増感から誕生した、高効率な有機無機ハイブリッド型
宮坂力 現代化学 2014.3 p24-29
- 【4】有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の研究開発動向
瀬川、中崎 電気計算 2024.8



ヤングの時代にはわかっていなかったが、光は原子から1つずつポツリポツリと放出されている。(レーザー光は別として)



さらに、光は粒である(光子)という見方もある。



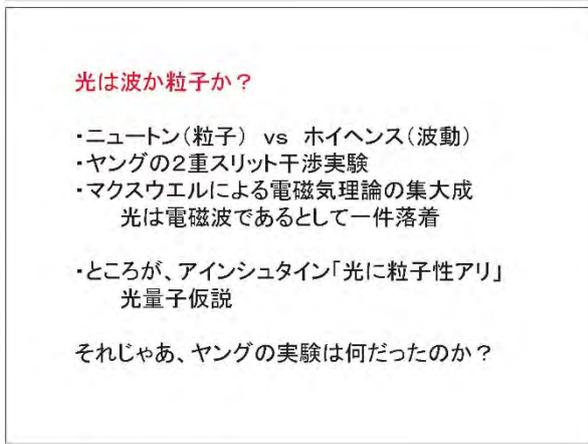
ヤングの干渉実験再訪

それじゃあ、ヤングの干渉実験とは何だったのか？

ポツリポツリと光子が飛んでくるのであれば、なぜ干渉縞ができるのか？

自然光で干渉縞はできるのか？

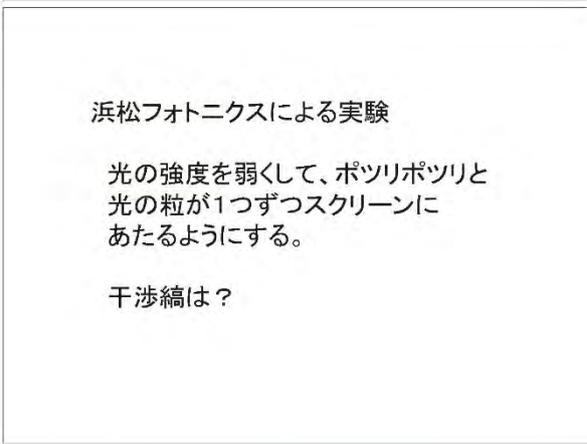
ヤングの時代にはレーザー光はなかった。何故実験が可能だったのか？



光は波か粒子か？

- ・ニュートン(粒子) vs ホイヘンス(波動)
- ・ヤングの2重スリット干渉実験
- ・マクスウエルによる電磁気理論の集大成
光は電磁波であるとして一件落着
- ・ところが、アインシュタイン「光に粒子性アリ」
光量子仮説

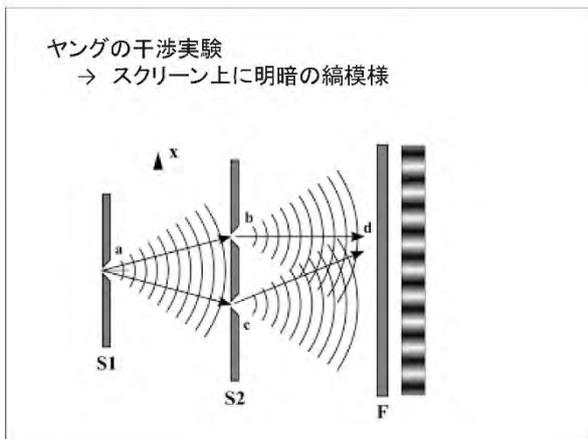
それじゃあ、ヤングの実験は何だったのか？



浜松フォトリクスによる実験

光の強度を弱くして、ポツリポツリと光の粒が1つずつスクリーンにあたるようにする。

干渉縞は？



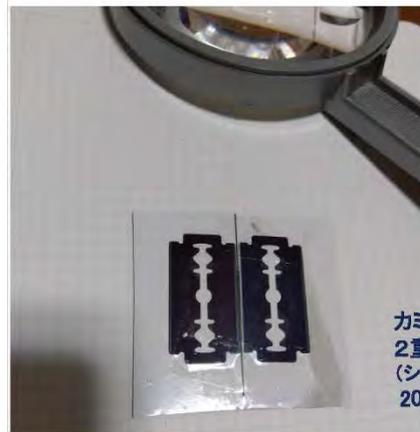
ヤングの干渉実験

→ スクリーン上に明暗の縞模様





単一光子によるヤングの干渉実験 (浜松ホトニクス/1992年)



カミソリの刃による
2重スリット
(シャープペンの芯)
2025.1.26

光子の描像では、光子一つ一つが
「自分自身と干渉する」

自然光でヤングの干渉縞を観察したい。
まだ、レーザー光の実験しかできていない。
どうすればいいか？



カミソリの刃による
2重スリット
(シャープペンの芯)
2025.1.26

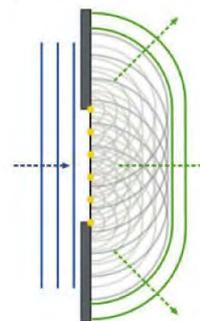
以下は、光源として市販のレーザーポインターを使用。

単スリットでも回折縞がスクリーン上に見える



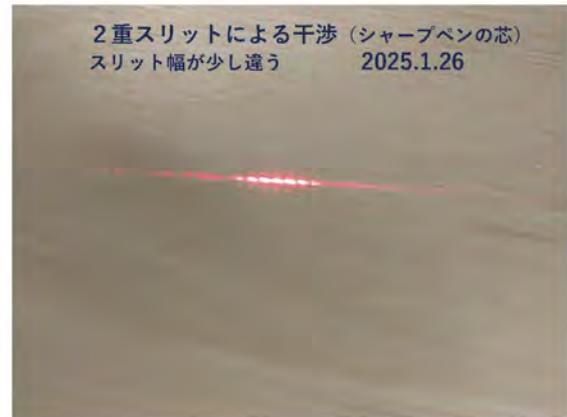
カミソリの刃による
2重スリット
(シャープペンの芯)
2025.1.26

ホイヘンスの原理

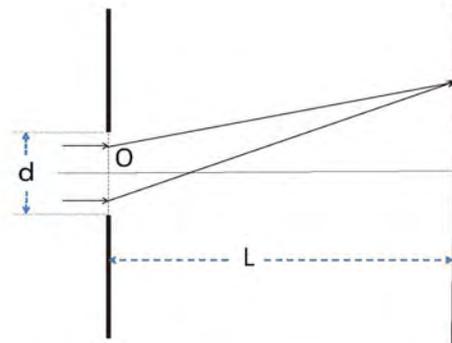


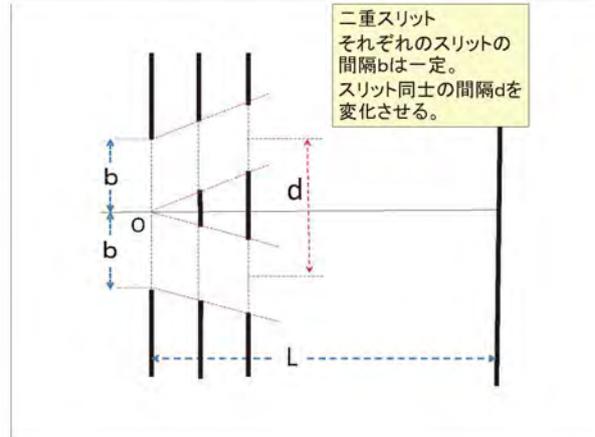
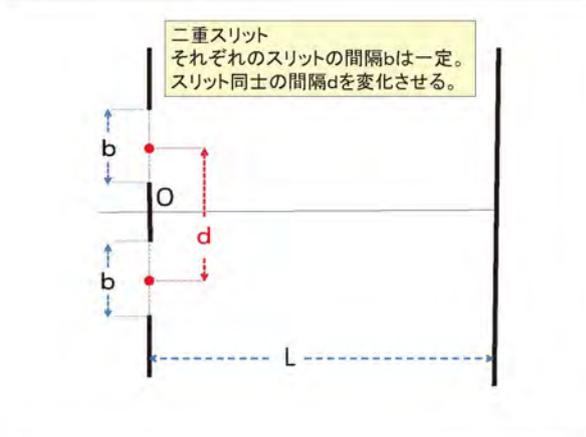
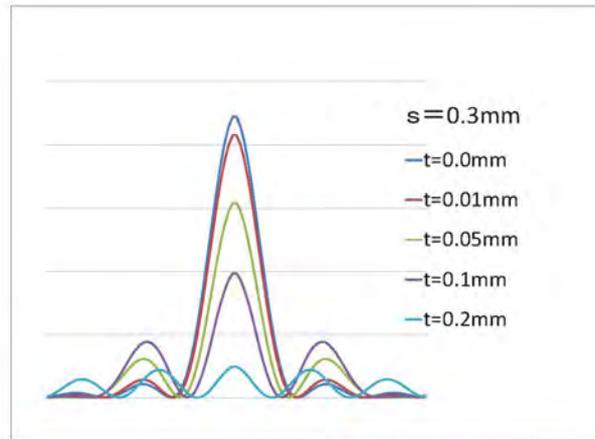
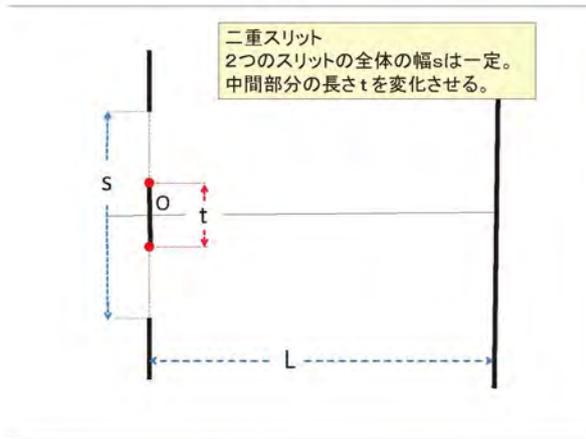


2重スリットでは



- ・自然光では、干渉縞に色がつくだろう
スクリーンに縞模様を映すのは難しい
⇒ 何かよい工夫はないだろうか
- ・マイケルソン干渉計はレーザー光を使っている
最近、眼科医で眼底検査に使われる
光学干渉断層装置(OCT)はマイケルソン干渉計を使っている。
光子画像ではやはり光子の自分自身との干渉
…だとすると1光子が巨視的なスケールで拡がる。
光子の場合は、波動関数が考えられないので
場の理論でこれをどう記述するか？
古典電磁波画像 ⇔ 量子場光子画像





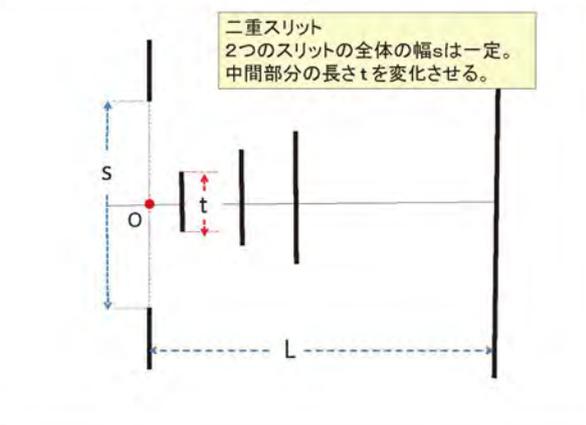
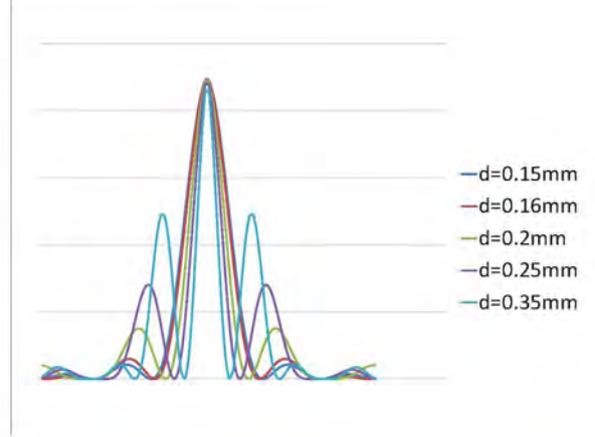
数値計算:
レーザーポインターの波長 $\lambda=635\text{nm}$

(Case-1) 全スリット間隔一定
 $s=0.3\text{mm}=3 \times 10^{-4}\text{m}$
 $t=0.0 \ 0.01\text{mm} \ 0.05\text{mm} \ 0.1\text{mm} \ 0.2\text{mm}$

(Case-2) 片側スリット間隔一定
 $b=0.15\text{mm}$
 $d=0.15\text{mm} \ 0.16\text{mm} \ 0.2\text{mm} \ 0.25\text{mm} \ 0.35\text{mm}$

$$d=(t+s)/2 \quad b=(s-t)/2$$

$$s=d+b \quad t=d-b$$





- ・現象を直感的に理解しようとすると、光の波動関数(～電場)を考えたいくなる。
- ・しかし、安易にやるのはよくないことも理解している。時と場合によって使い分ける必要がある。

「光の波動関数は存在しないのか」北野氏より

- ・光子の波動関数(空間表示の確率振幅 $\psi(r)$) は存在しないといわれている。
- ・しかし、光子を用いた量子現象の研究において、光子の波動関数は無造作、無批判、無意識に利用されている。

2つの極論

- ・原理派「光子の波動関数は存在しない。場の理論を使うべし。」
- ・現実派「古典的電場に相当するものを波動関数と見なせばよい。」

いずれも極論・・・時と場合による

「量子光学」久我著

次の3つの場合がある

- ・光子でないと説明できない現象
- ・光子と考えた方が理解しやすい現象
- ・光子と考えると理解しにくくなる現象

- ・統一的描像が欲しい
- ・量子情報、量子光学、観測問題

今後の日程

- 第 154 回 4 月 27 日 (日) 13 時 ~ 西村 靖紀 様
- 第 155 回 5 月 25 日 (日) 13 時 ~ 竹内 学 様
- 第 156 回 6 月 29 日 (日) 13 時 ~ 久米 健次 様
- 第 157 回 7 月 27 日 (日) 13 時 ~ 寺川 雅嗣 様

HP <http://www.cis-laboratories.co.jp/index.html>

以上

2025-4-10 文責 山本洋一