

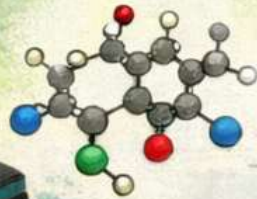
シリコンじゃない有機半導体とオープンソース半導体の活用

ISHI会三周年記念イベント 2026. 5. 6

有機半導体の研究



有機ELディスプレイ



有機分子材料



有機半導体 + シリコン半導体

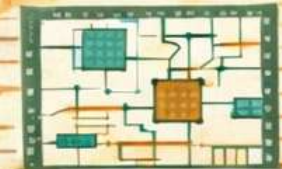
ISHI会で学ぶ!

半導体チップ設計
・エンジニアリング体験

オープンソース半導体



RISC-V オープンチップ



自作デバイス体験

有機半導体の開発
とても面白い!

オープンソースの半導体も
学べて楽しい!

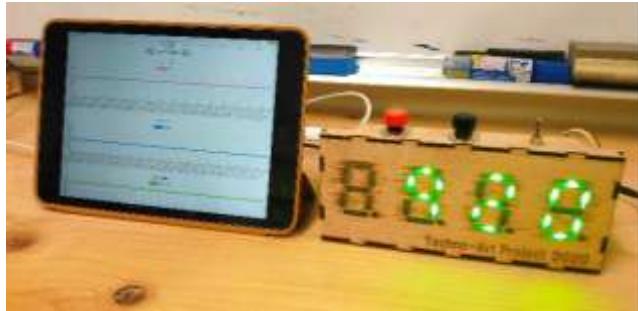
九州産業大学 理工学部 機械電気創造工学科 貞方 敦雄

自己紹介



貞方 敦雄
1985年10月22日
趣味 **電子工作**
ものづくり
研究 **有機・無機半導体**

2004 九州産業高校 機械科 卒業
2008 九産大 工学部 電気工学科 卒業
2010 九産大 大学院・修士(工学)
2013 東京科学大学 (東工大)・博士(工学)
2015から 九産大に着任、理工学部 電気工学科
2026から 理工学部 機械電気創造工学科



多機能置時計



LED電子ルーレット



電子工作ワークショップ



半導体ワークショップ



キャンパスイルミネーション



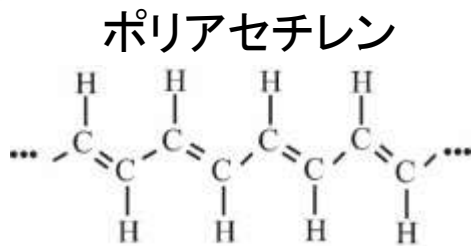
卓上灯籠



光るアクリルスタンド



有機トランジスタ



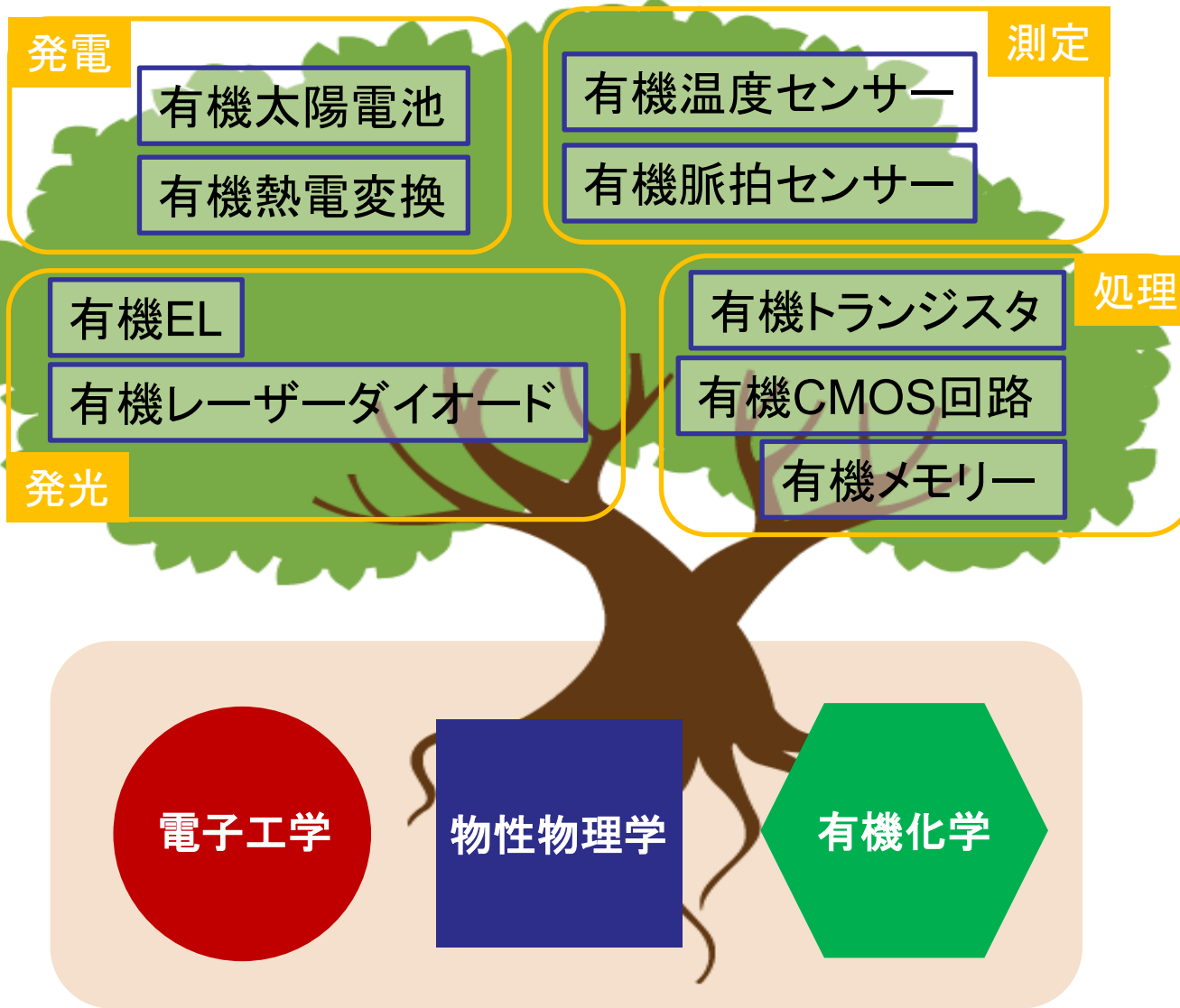
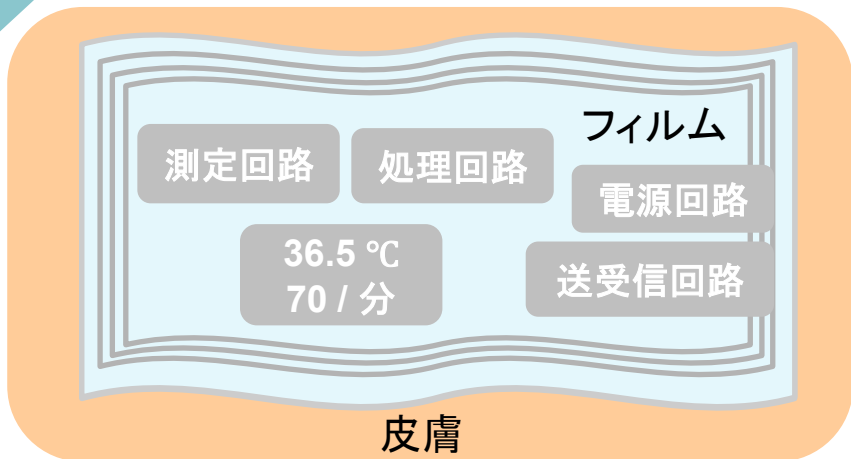
電流が流れる

- 多様性
- 柔軟・軽量性
- 生産性
- 生体・環境調和性

有機分子の個性を生かした
面白いエレクトロニクス

近い将来

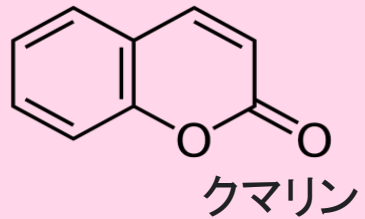
ペースタブル
ヘルスケアデバイス



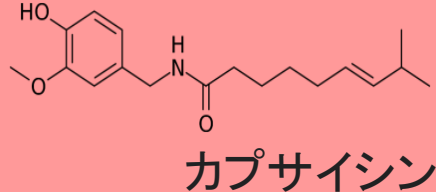
有機分子の個性を見つけ、電子デバイスに応用

4

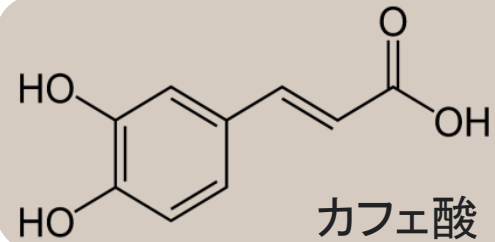
香



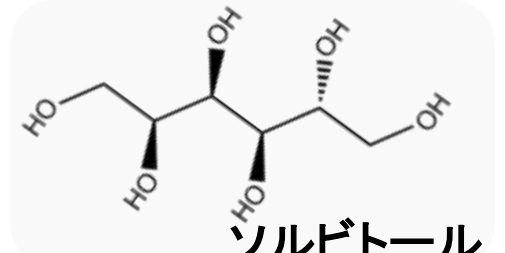
辛



苦



甘



有機太陽電池

有機EL
ディスプレイ



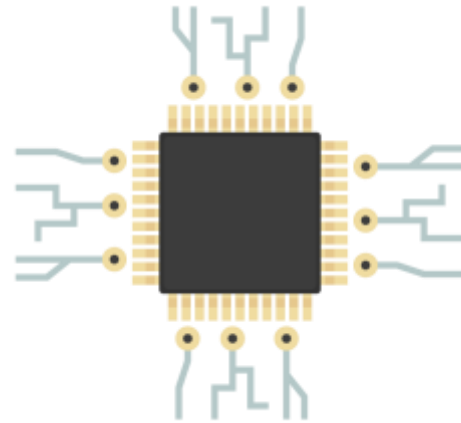
日常に潜む面白い分子を探し出し



分子の持つ個性を活かした
電子デバイスに応用

有機エレクトロニクス

モノづくりの世界



How to make

1. 玉ねぎをみじん切り、炒める
2. 合いびき肉・炒めた玉ねぎ・パン粉・牛乳・塩こしょうを入れ混ぜる
3. ハンバーグを中火で両面焼く。
4. テリヤキソース(醤油・みりん・砂糖・酒)を加える
5. 中火で煮詰めながらハンバーグにソースを絡める
6. バズを軽くトースト
7. バズの内側にマヨネーズを塗る。
8. 下バズ → レタス → テリヤキハンバーグ → トマト(お好み) → 上バズの順に重ねる



てりやきビーフバーガー



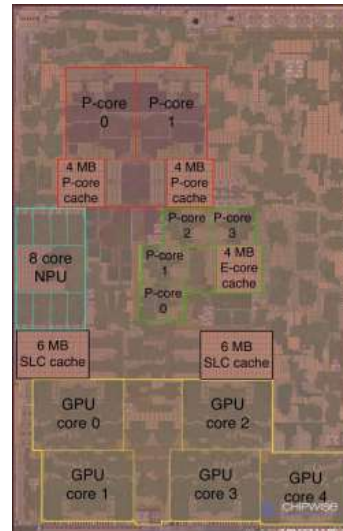
What to make

- ① ターゲット層
メインターゲット：
10～30代の男女
サブターゲット：
外国人観光客
「和風バーガー」特別感
家族連れ
子どもにも食べやすい味
- ② 商品コンセプト
「和の味わい×手軽さ」
- ③ 価格設定
若年層向けは「コスパ重視」、
プレミアム層向けは
「素材・体験重視」

How to make

- ① 仕様設計（システム設計）
どんな機能を持つチップを作るか
- ② 論理設計（ロジック設計）
回路の動作を設計
- ③ 物理設計（レイアウト設計）
トランジスタや配線の配置を設計
- ④ マスクデータ作成
回路パターンの原版の作製
- ⑤ ウェハ製造（基板作成）
- ⑥ 前工程（微細加工プロセス）
回路パターンをウェハに転写
- ⑦ 後工程（パッケージング）
ウェハをカットしてチップへ
- ⑧ 検査・テスト

Apple iPhone 17 Pro



半導体チップSoC

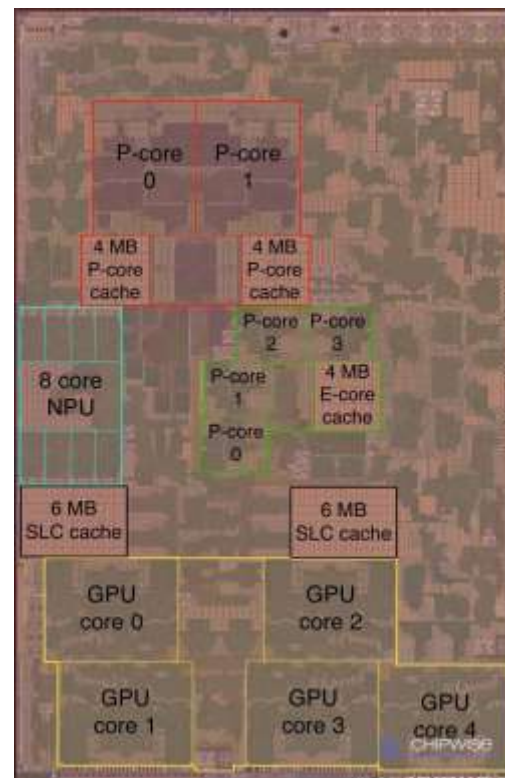
What to make

- ① ターゲット市場の設定
民生機器向け市場
自動車向け市場
産業機器向け市場
データセンター・AI市場
通信市場
- ② 製品コンセプト・価値提案
「高性能・低消費電力・
小型化」で差別化
「信頼性・長寿命」を重視
「コスト効率と安定供給」
- ③ 市場拡大戦略
新興国市場（インド、東南
アジアなど）への展開

ハンバーガーの作り方は
イメージできる



半導体の作り方は
イメージできない



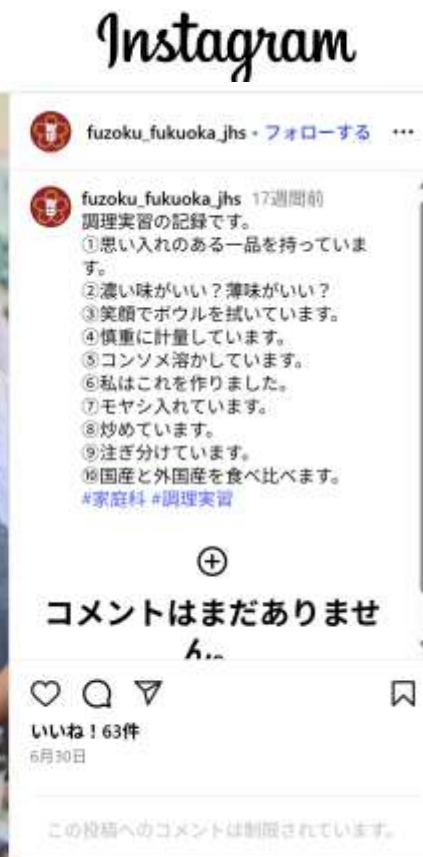




ご家庭



福岡教育大学附属福岡中学校



低学年で、半導体のモノづくりを「実体験」することができる？ 11

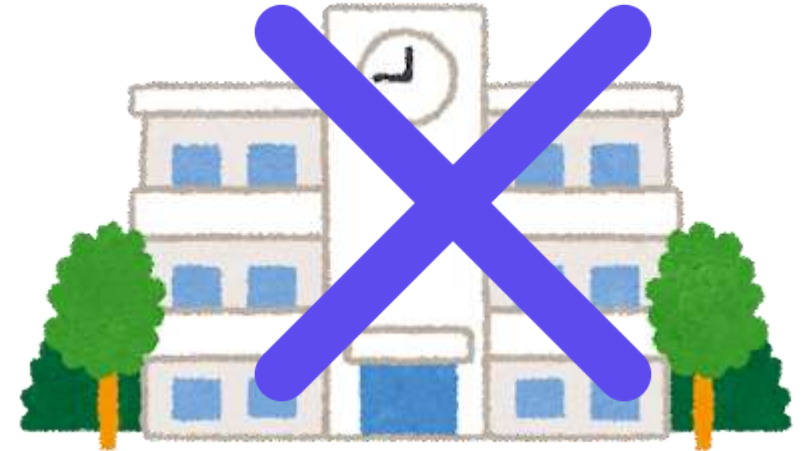
おままごとで学ぶ



ご家庭で学ぶ



小中高校で学ぶ



電子工作を通じて
半導体部品を使ってみる
を実体験することはできる



半導体を作るとは別物



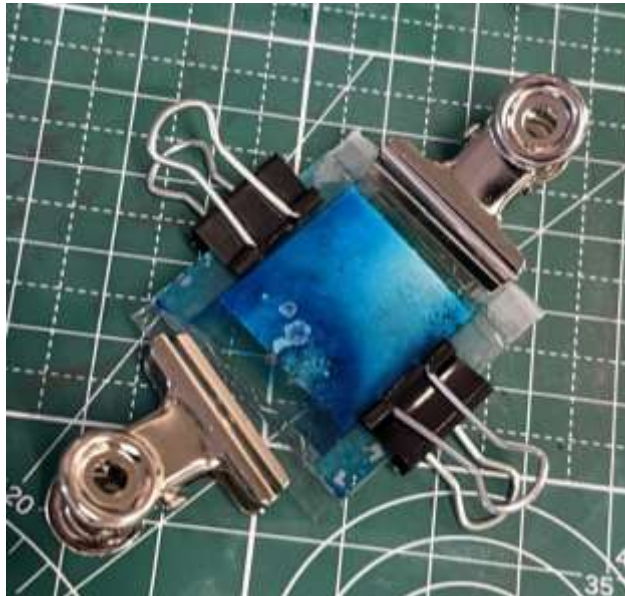
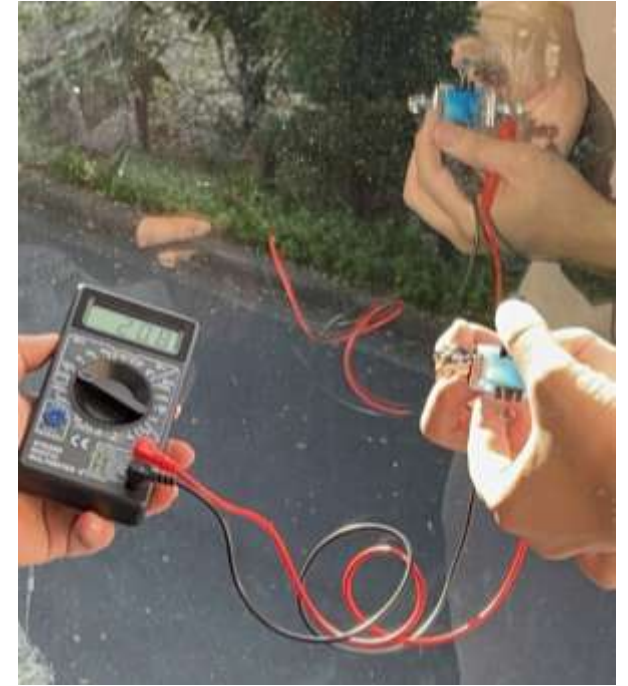
香椎東公民館での電子工作教室

色素増感太陽電池を作るワークショップ



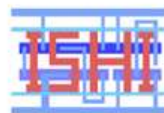
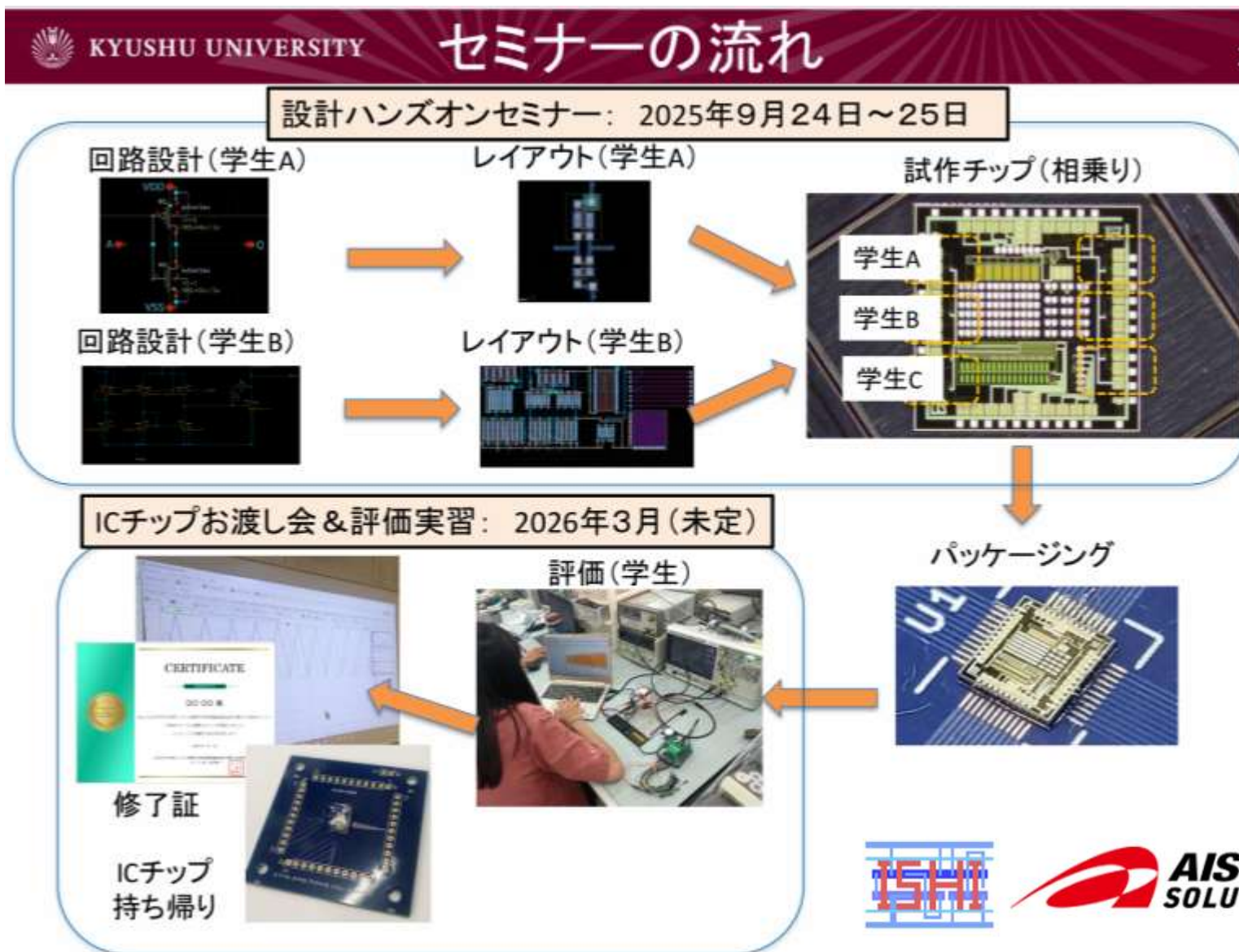
ISHI会

皇居のお隣
科学技術館

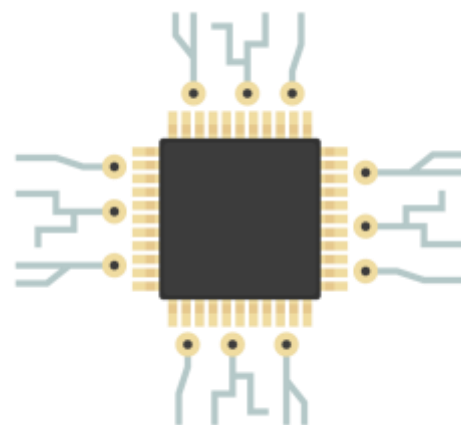


カラフルな太陽電池を
作って、お日様の光に
当てて発電しているか
確かめよう

九州大学と九産大で半導体設計ハンズオンセミナー開催 13



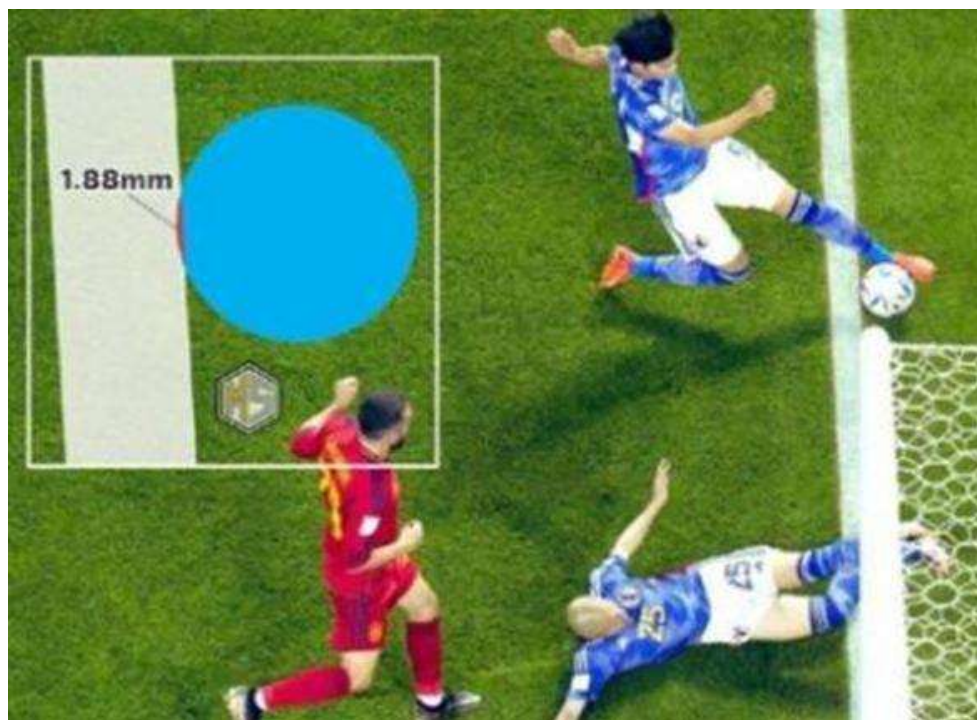
半導体の小話



2022年FIFAワールドカップ、強豪スペインに2-1で逆転勝利を果たし、世界に衝撃を与えたサッカー日本代表

半導体素子

ボールの運動を検出するMEMS慣性センサーを内蔵

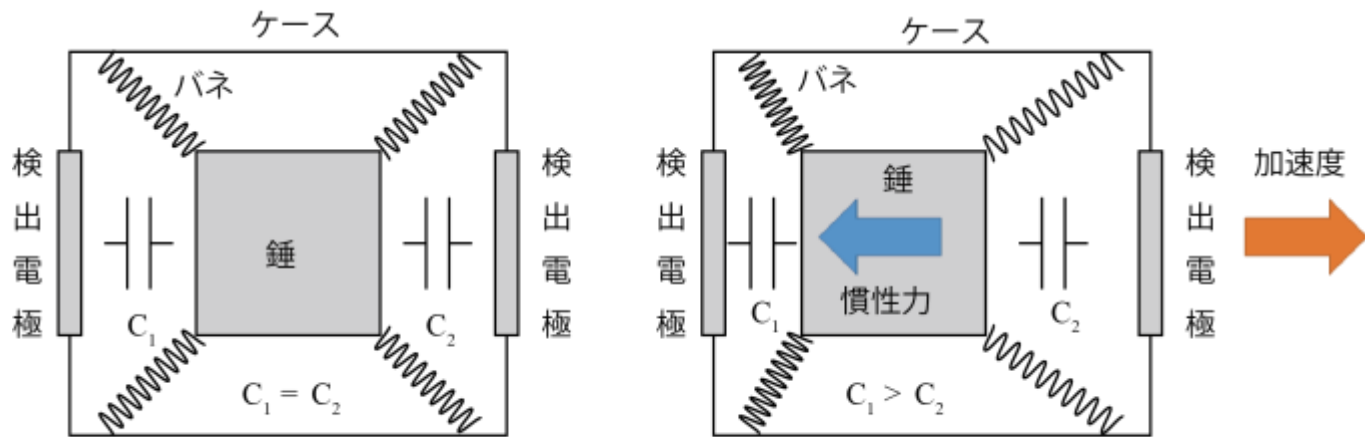


物体が運動すると、加速度や角速度が生じる



MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)とはシリコンウェハなどの上に、微細加工技術を用いて電子回路やセンサ、機械的に動くアクチュエーターなどを作りこんだ部品

MEMS加速度センサーの構造原理



(1) 加速度 0 の状態

(2) 加速度が加わった状態

錘の偏りを静電容量の変化で捉え、加速度を知る

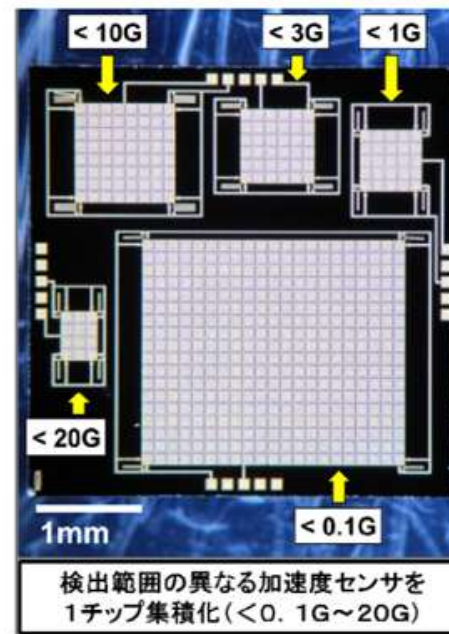


図1：チップ写真

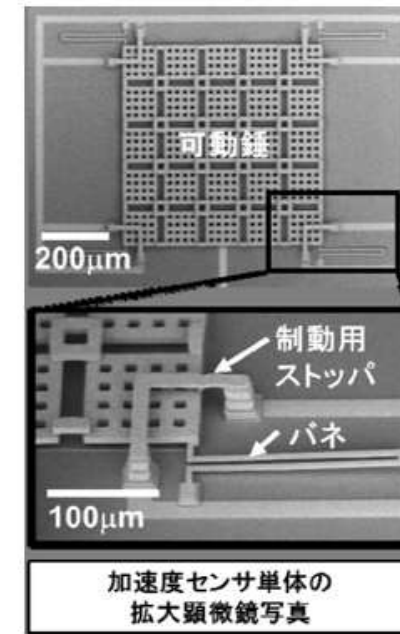


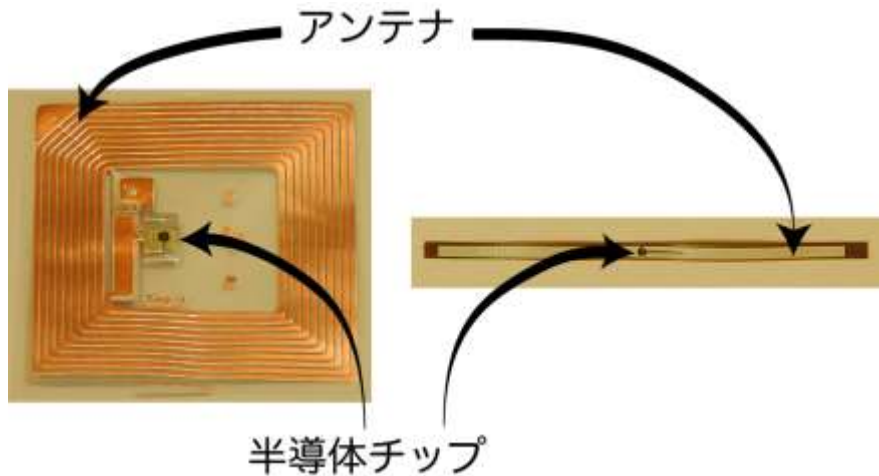
図2：電子顕微鏡写真



購入した商品を、
この指定のエリアに置くだけ！
カゴごと置いてもOK!



指定エリアに置いた商品が表示されます。



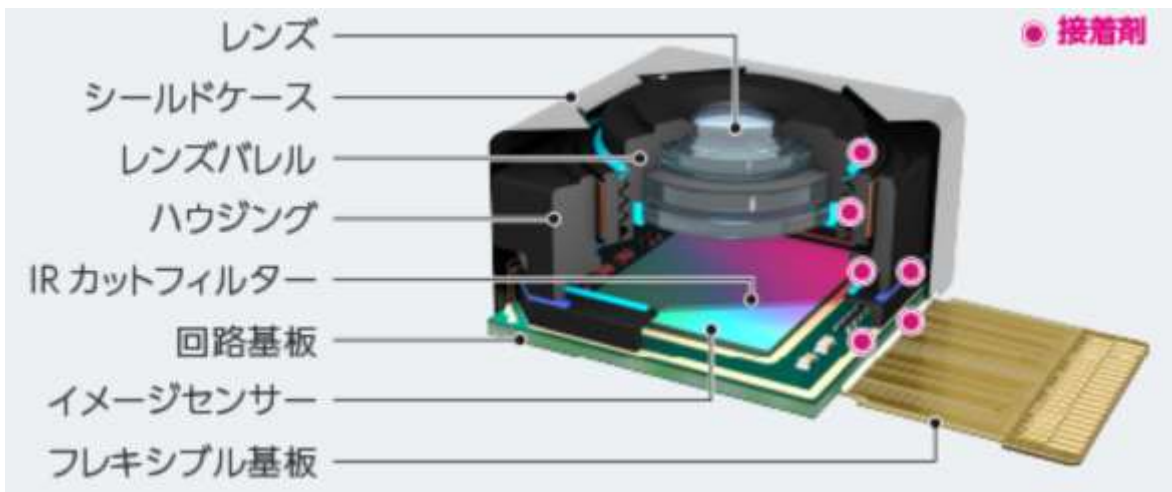
RFIDタグ (無線ICタグ) を商品に取り付け
↓
リーダーで読み取り一瞬で自動会計ができる



熊本の路面電車



自動販売機



カメラモジュール

QRコードをスマホのカメラで読み取る



支払いが完了

イメージセンサー (撮像素子) という半導体デバイスが使われている

IC (集積回路)

マイクロ (いろいろな計算)

CPU、プロセッサ、マイコン



プロセッサ



マイコン

ロジック (特定の計算)

汎用ロジック、ASIC、FPGA



FPGA



オペアンプ

アナログ (流れを制御・増幅)

ダイオード、オペアンプ、MOSFET



DRAM

メモリ (記録)

DRAM、フラッシュメモリ、SDカード



SDカード

非IC (集積回路以外)

オプト (発光)

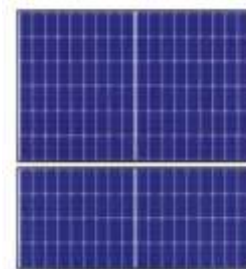
LED、レーザー、太陽電池



LED



レーザー

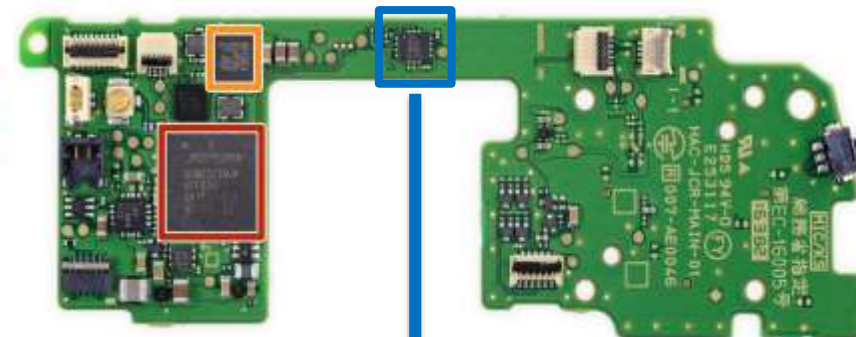


太陽光電池

センサ (物理量を測定)

加速度センサ、角速度センサ

switchのジョイコン



ディスプレイ (単体で動く)

ダイオード、トランジスタ、パワーデバイス



加速度・角速度センサー
人の動きを測定



ゲームの世界とつながる

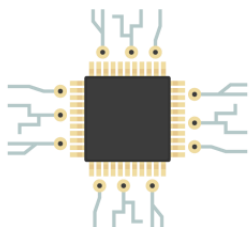
電気自動車のモーターを動かす



ゴムは電気を流さない絶縁体



金属は電気をよく流す導体

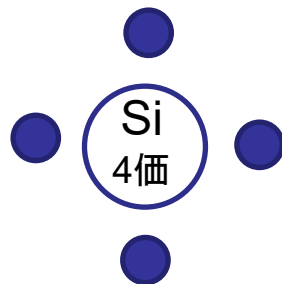
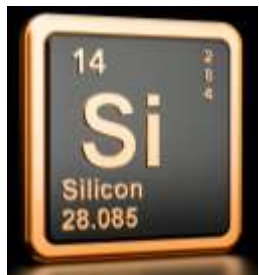


半導体は、電気の流れをON/OFFできる材料



砂場にあるシリコンが世界を動かしている!?

シリコン (Si)

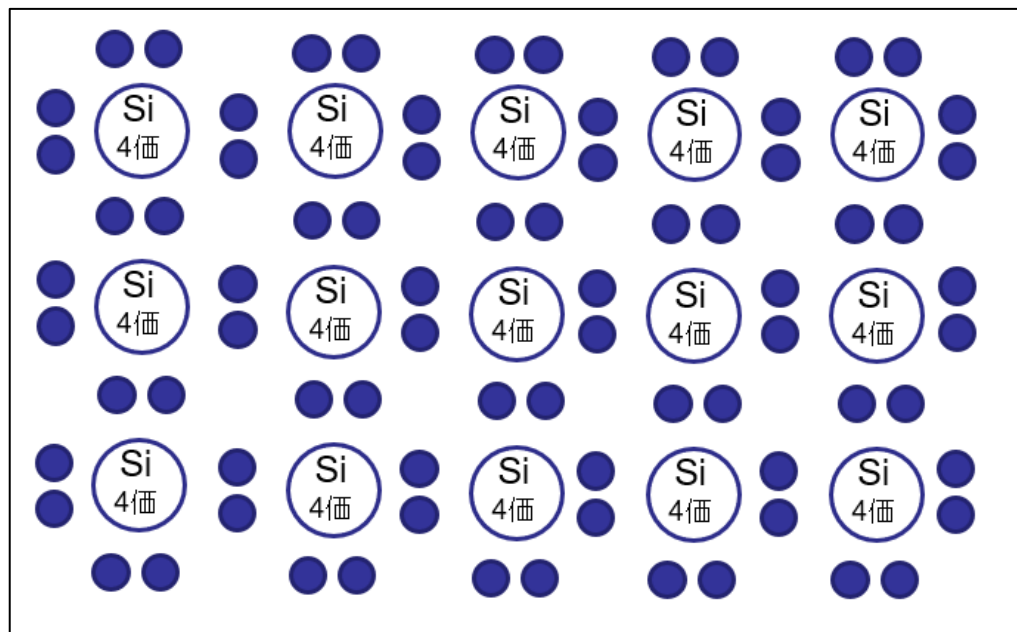
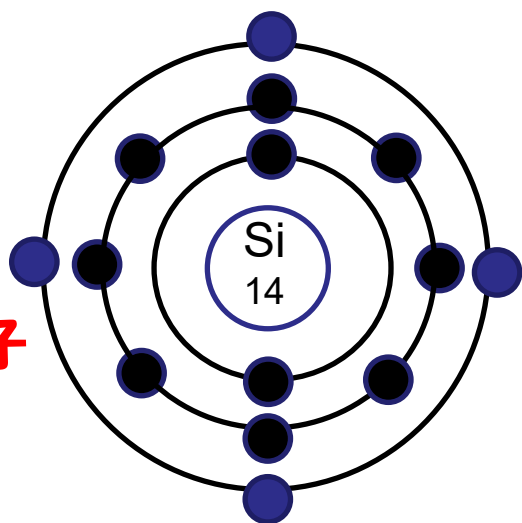


シリコンSiには
自由電子が4個ある

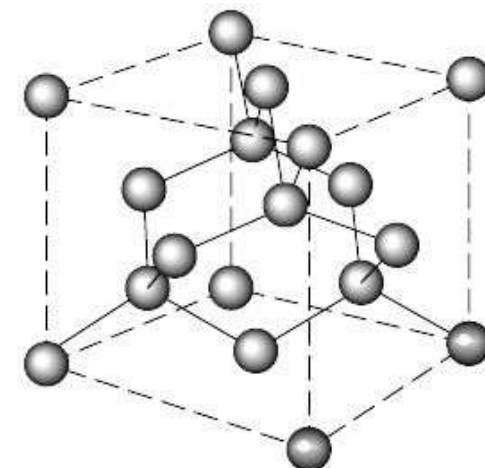


ケイ素とも呼ばれる
地球上で2番目に多い元素
半導体に丁度よい性質

お互いに共有結合して結晶を作る



Siダイヤモンド格子



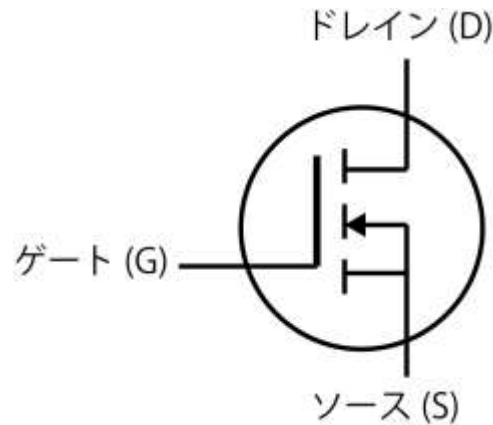
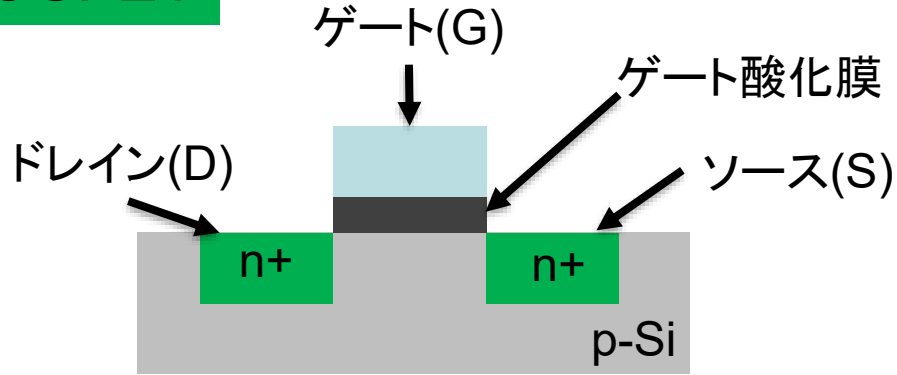
一辺の長さは0.543 nm

固い

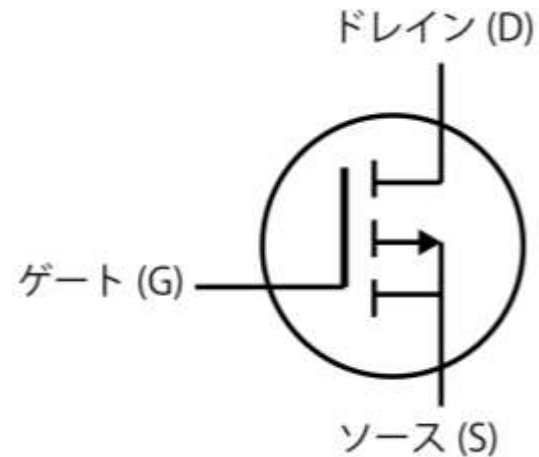
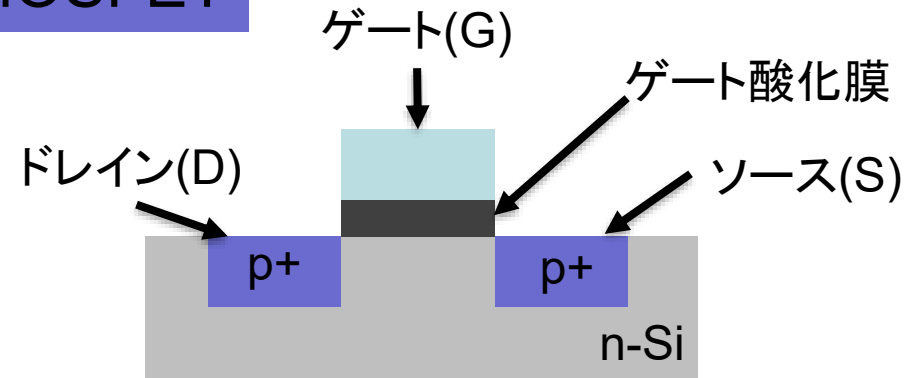
シリコン半導体から有機半導体へ

柔らかい

n-MOSFET



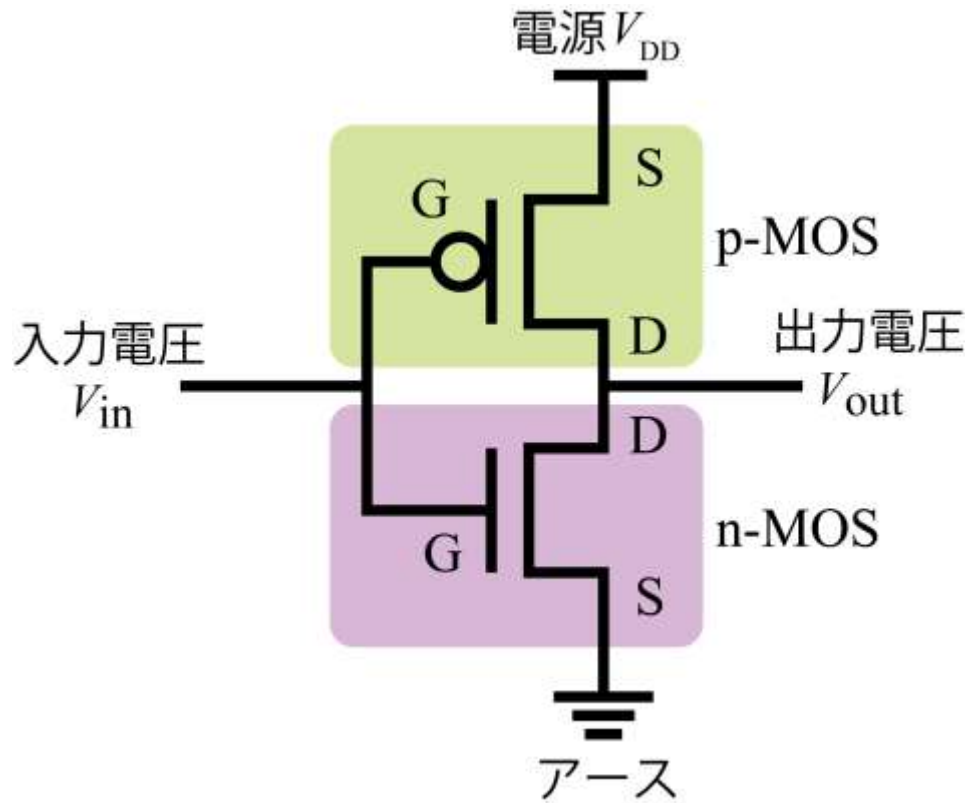
p-MOSFET



アナログ回路: 電流や電圧を増幅する半導体素子として扱う
デジタル(ロジック)回路: HighかLowかの2つの状態をスイッチする半導体素子として扱う

最も基本的な「インバーター(NOT)回路」

インバーター回路とは、0(L)を入力すると1(H)、1(H)を入力すると0(L)を出力する回路

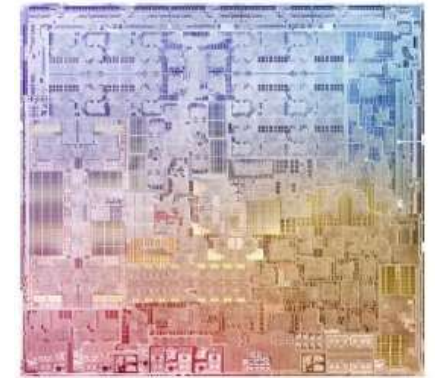


汎用ロジックIC
インバーター回路
74HC04 (6回路)

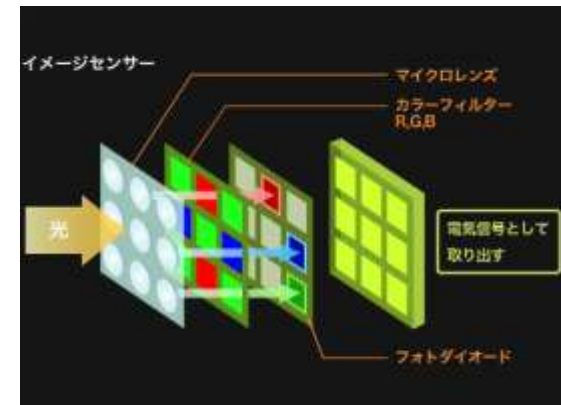


最先端のチップにも
インバーターが使わ
れている

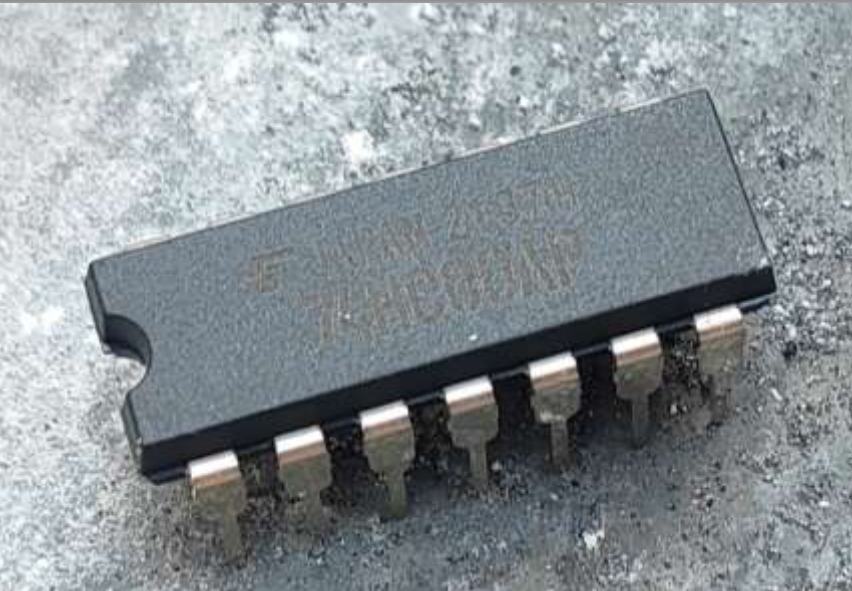
Apple M2チップ



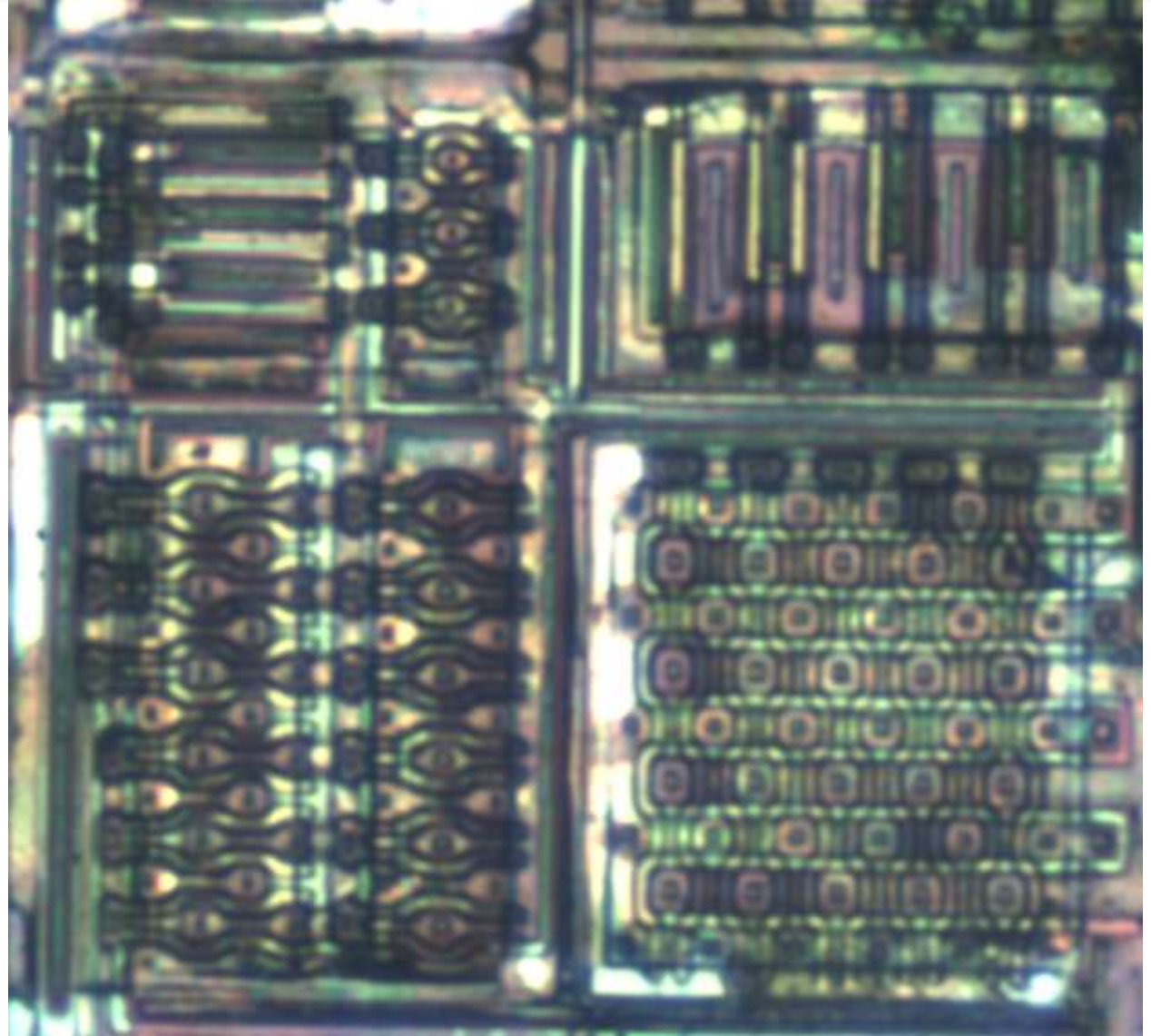
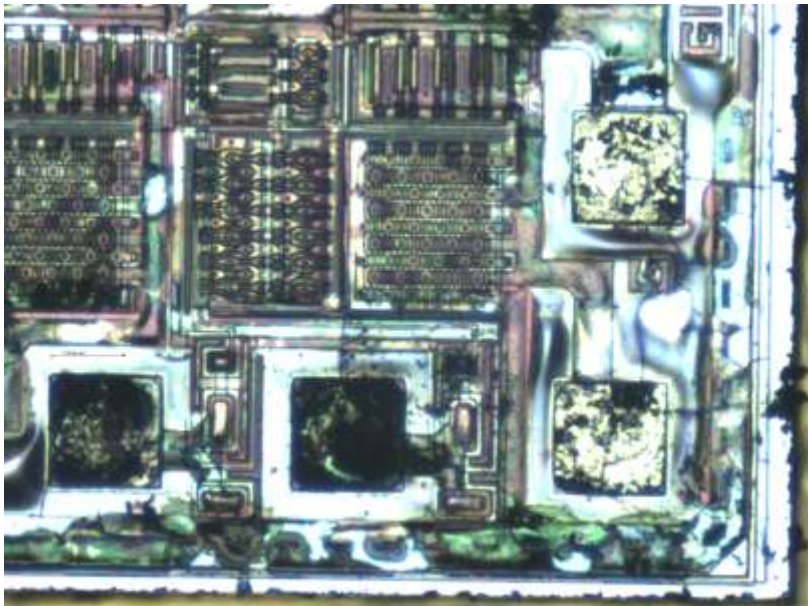
CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサーがスマートフォンなどのカメラの撮像素子にも使われている



ロジックICの中で、MOSFETはスイッチとして動く

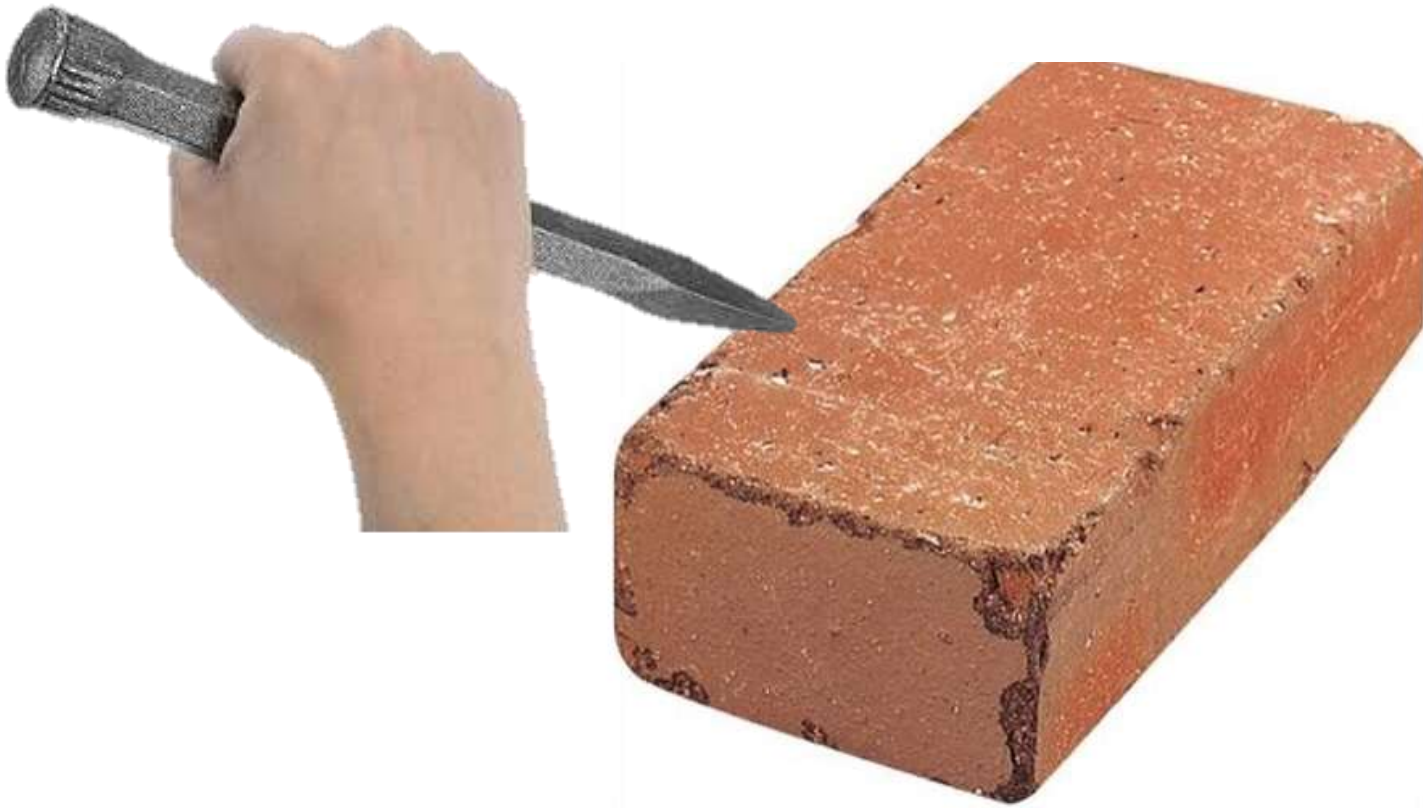


NANDが作り込まれたシリコンダイ



MOSFET(CMOS)のレイアウトパターンが見える

ノミ ⇒ 微細加工技術



模様⇒回路パターン
を刻み込む

レンガ ⇒ 固いシリコンの塊

瓦は丈夫そうだが



固い瓦は割れる!!



九州産業大学1号館屋上 シリコンでできた太陽光パネル



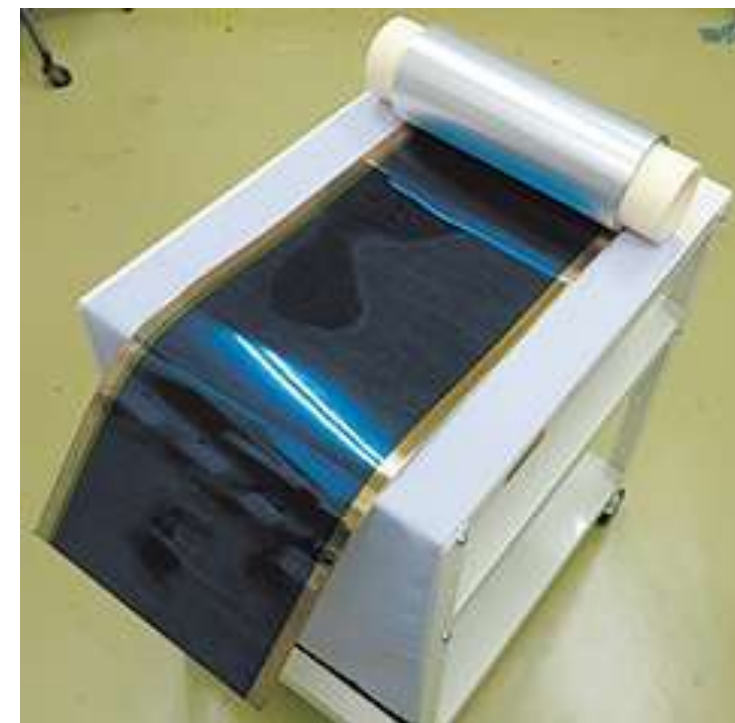
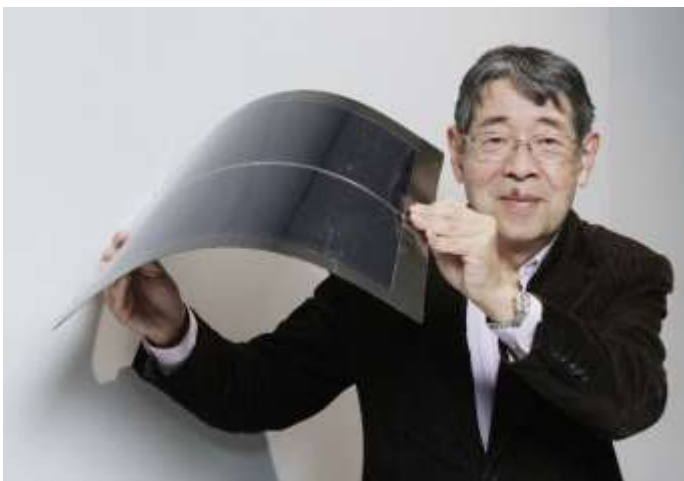
曲げるとバキバキに割れる



固いシリコンから有機分子を用いた柔らかいデバイスへ 32

従来、ちょっと曲がるシリコンでできた太陽電池は存在した

曲げれるレベルが違う! 軽量の太陽電池を簡便な方法で製造できる



桐蔭横浜大学 宮坂 力先生

積水化学工業が製造するペロブスカイト太陽電池

なぜ有機分子に電気が流れる？

電気が流れないが常識

→ 電気が良く流れる大発見34

The Nobel Prize in Chemistry 2000



Alan J. Heeger
Prize share: 1/3



Alan G. MacDiarmid
Prize share: 1/3



Hideki Shirakawa
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Chemistry 2000 was awarded jointly to Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid and Hideki Shirakawa "for the discovery and development of conductive polymers".

導電性高分子の発見と発展に 対してノーベル化学賞が与えられた

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/

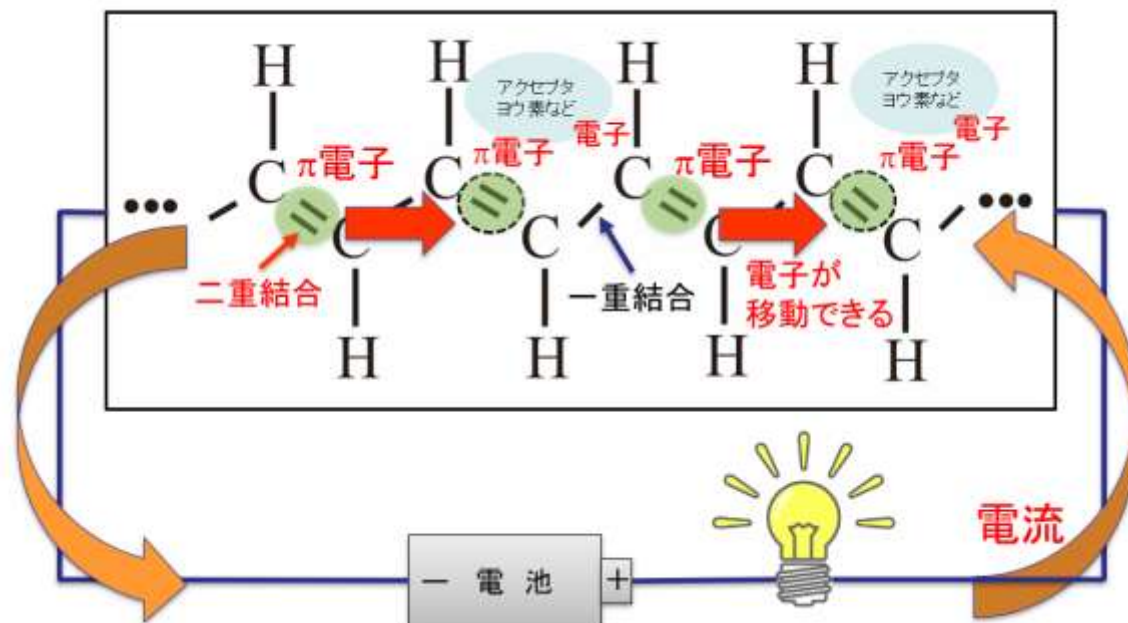
ポリエチレン

1978年まで、高分子材料やプラスチックは電気を流さないが常識



ポリアセチレン

1978年、導電性高分子の発見



ベンゼンとは、6個の炭素原子からなる正六角形の構造（ベンゼン環）。

グラフェンとは、炭素原子が網目のように六角形に結びついてシート状になっているもの。

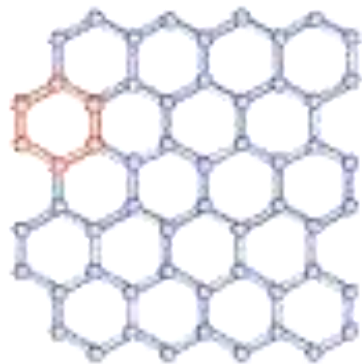
例えば、鉛筆の芯の黒鉛は、グラフェンシート1枚1枚のシートが重なり合っています。

グラフェンなどを多環芳香族化合物と呼ぶ。

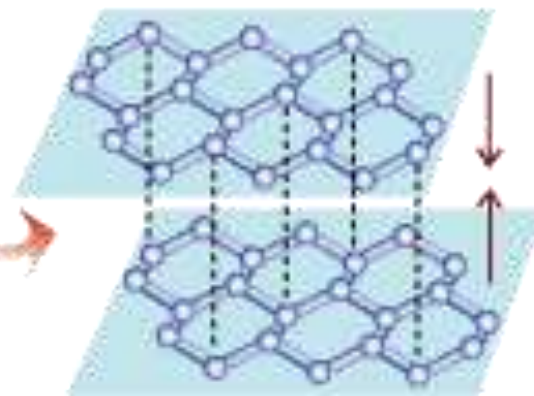
炭素 ベンゼン



グラフェン



積み重なると

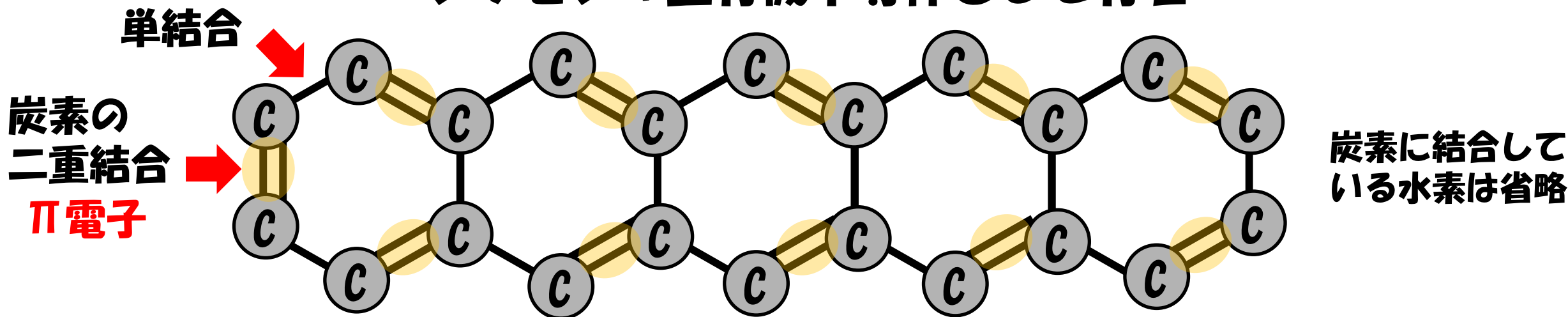


黒鉛(鉛筆の芯)

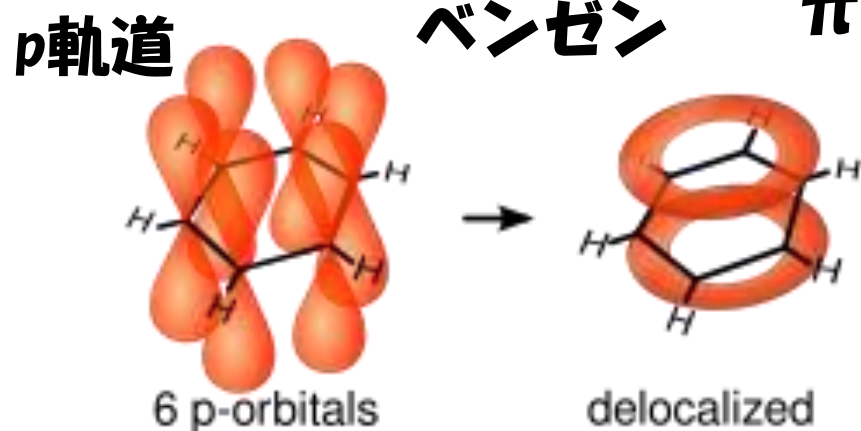


黒鉛は
電気を流しやすい
なぜ？

ペンタセン P型有機半導体として有名



単結合と二重結合が交互に並び、
π電子が分子全体に非局在化して動き回れる構造

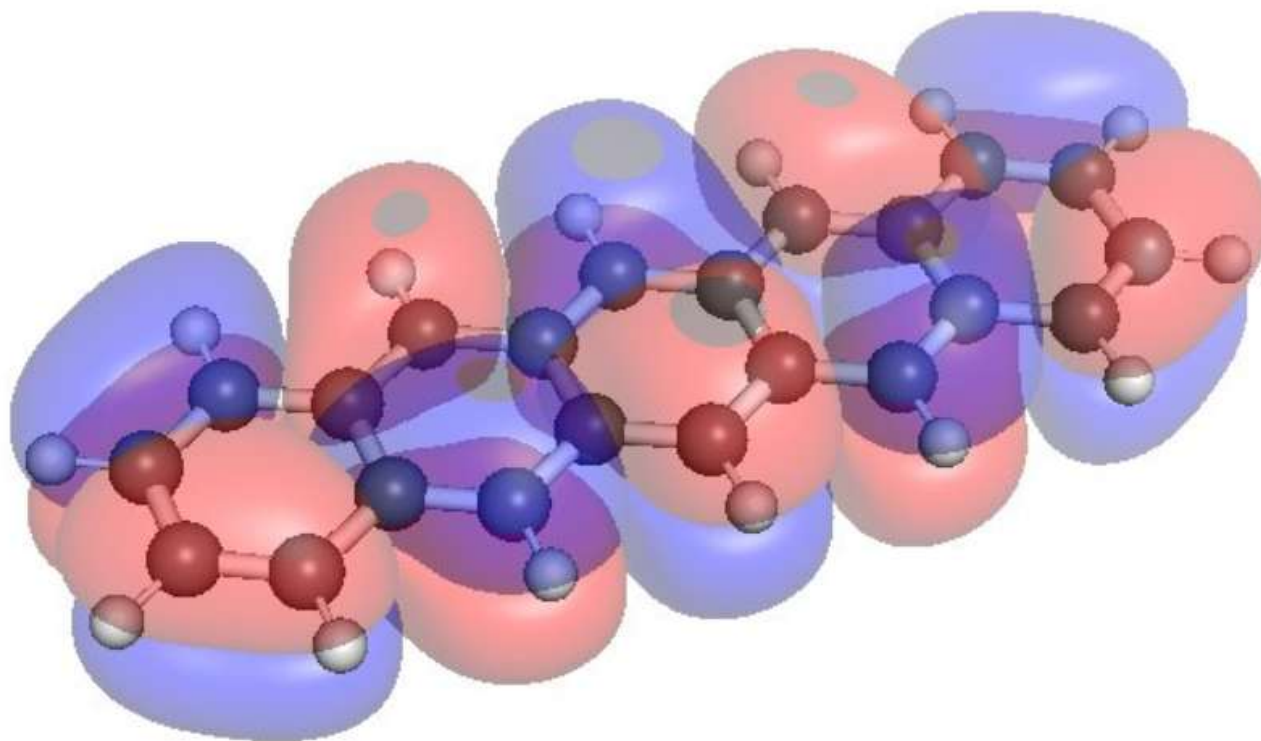


π共役系

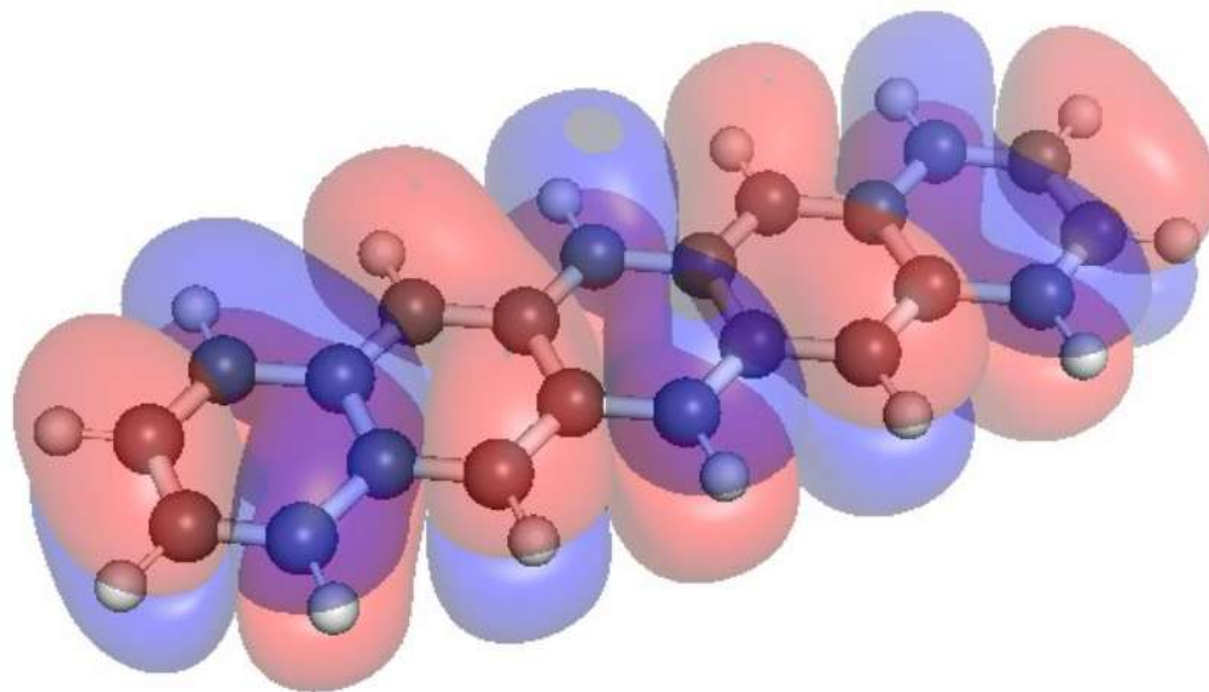
π共役系化合物

電圧を印加するとπ電子
が自由に移動できる

分子軌道 (MO) は電子が見出される可能性が高い分子中の領域を表わす



HOMO



LUMO

比較項目	無機半導体	有機半導体
電子性能	◎	△～○
耐久性・安定性	◎	△～○
製造コスト	○	◎
柔軟性・軽量性	×	◎
設計自由度	△	◎

有機分子の持つ個性を活かした半導体デバイスへ応用を目指す

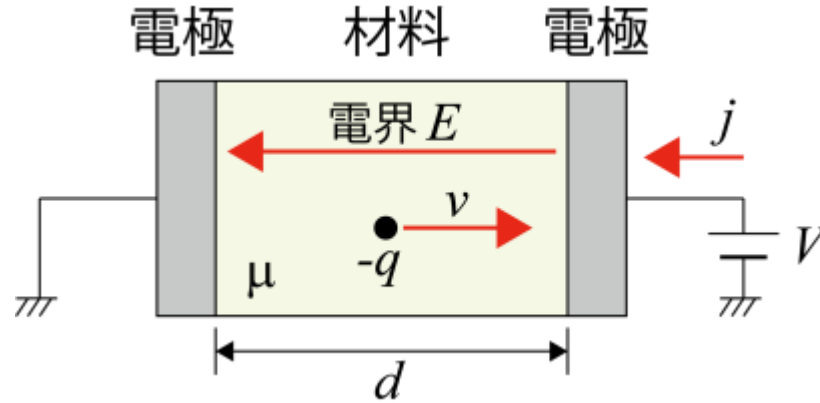


移動度 μ はデバイスの様々な挙動を表す

ドリフト速度 v

電流密度 $j = qn \mu E$

移動度が高いと
流せる電流も大きい
周波数特性も良くなる



シリコン(無機半導体)

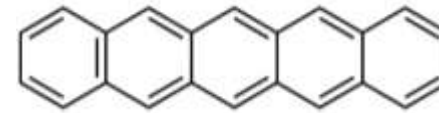
ペンタセン(有機半導体)

移動度
 μ [cm²/Vs]

hole: 430
electron: 1480

hole: ~1
electron: ~0.1

Organic < amorphous-Si < poly-Si < Si, Ge, GaAs
< 10[cm²/Vs] 10²[cm²/Vs] 10³[cm²/Vs]



光る有機半導体：有機EL

有機ELはディスプレイ史をたった約10年で大きく変えた 41

1988年
シャープ
テレビ用14インチ
TFT液晶ディスプレイ

1953年
シャープ
国産ブラウン管
テレビ販売



Sony XEL-1
販売日:2007年
サイズ:11V型
解像度:VGA
(960×540)
価格:20万円



SHARP
4T-C48CQ1
販売日:2020年
サイズ:48V型
解像度:4K
(3840×2160) 価格:15万円



Apple iPhone13 Pro
販売日:2021年
サイズ:6.1型
解像度:Super Retina XRD
(2532×1170)



任天堂 Switch
販売日:2021年
サイズ:7型
解像度:1280×720
価格:4万円

有機EL時代が到来

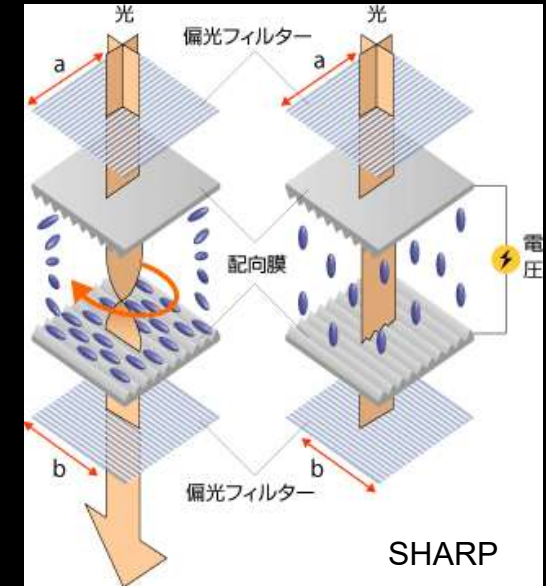
1926年
高柳健次郎が撮像に円盤を使い、
世界初、映像にブラウン管を使った受像装置を開発

今、真っ黒なシーンを表示しています。
薄っすらと明るく見えますよね？

液晶（プロジェクタ）ディスプレイは
白色バックライトの光を液晶分子が
ブラインドの様に光の透過を制御

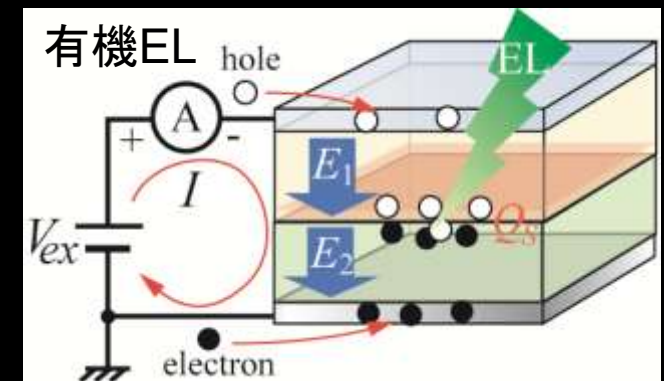


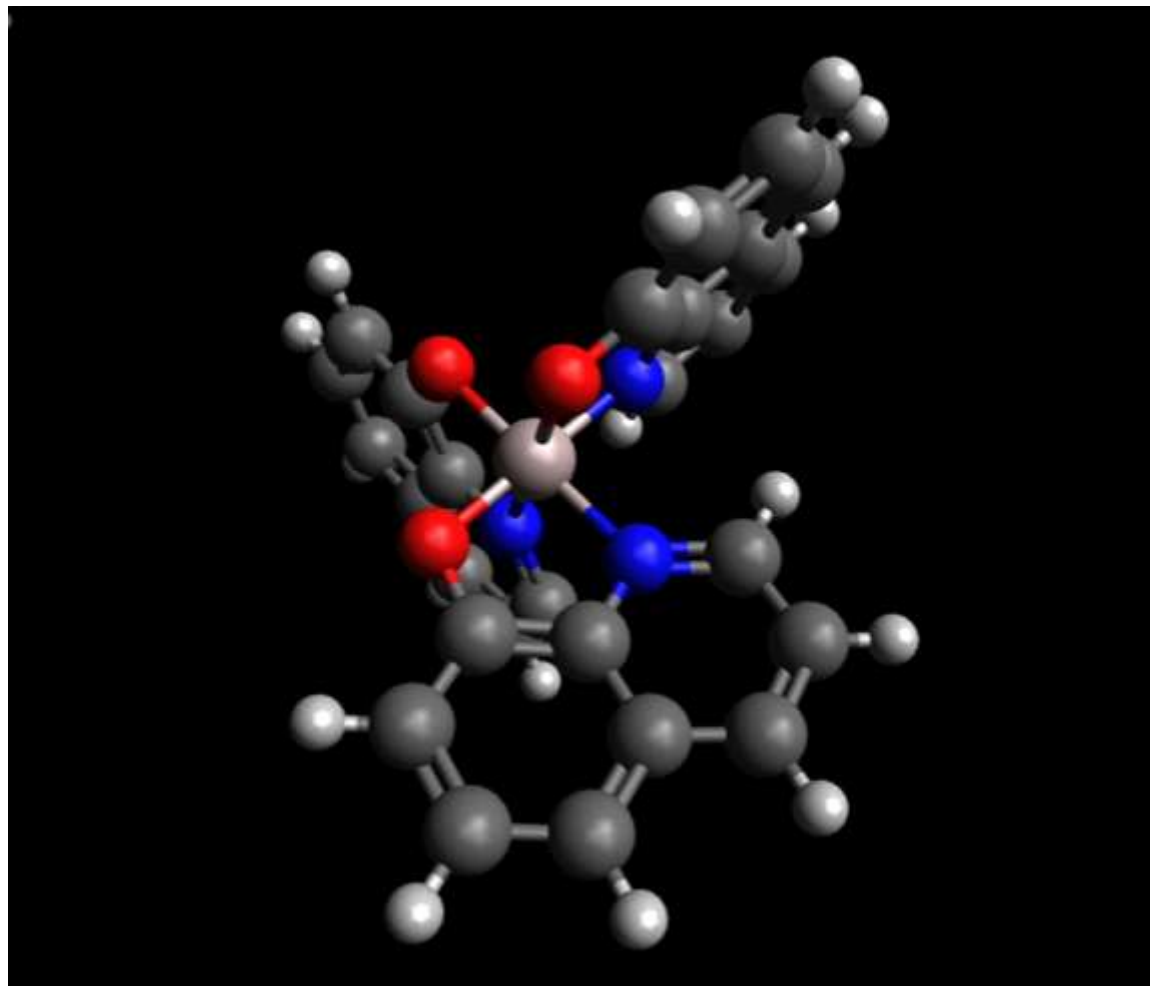
液晶ディスプレイ



液晶ディスプレイでは真っ暗を表現するのは難しい

有機ELは有機分子に
電流を流さなければ光らない
真の黒を表現できる！

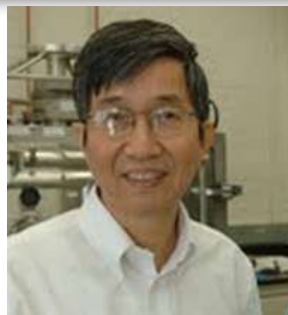




緑色に発光するAlq₃



5cm角サイズのREマーク

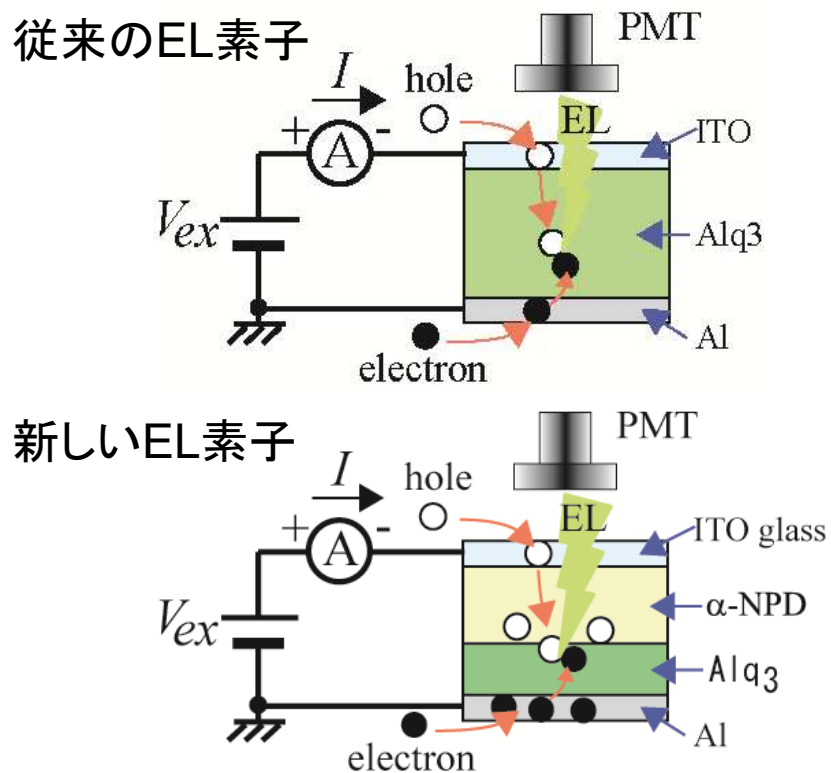


1987年、C. W. Tang
機能分離を考えた2層積層型EL素子を提案

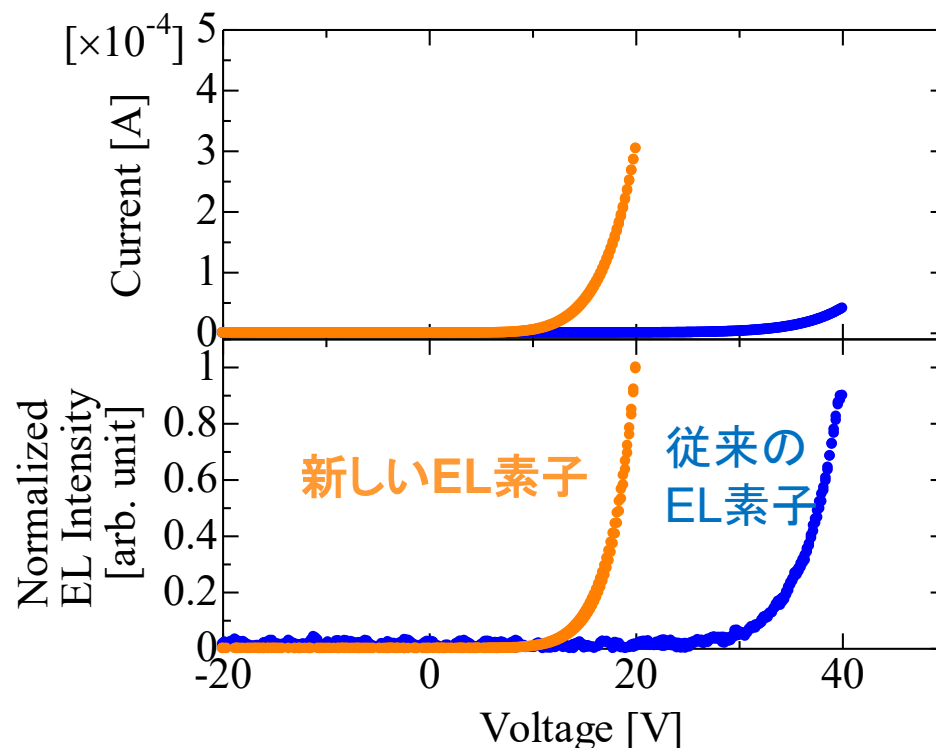
2層積層素子では駆動電圧が大幅に低下



新しい折曲がるディスプレイへ進展



α -NPD: 正孔輸送層、Alq3: 電子輸送及び発光層



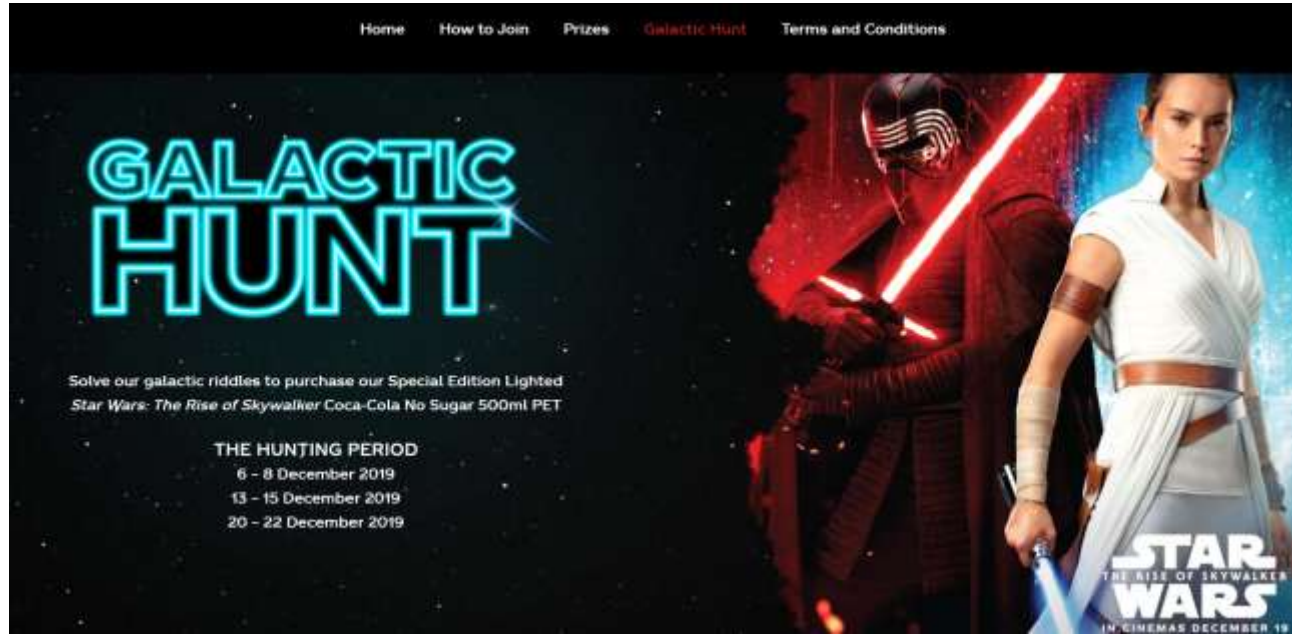
- ITO/NPD(150nm)/Alq3(50nm)/Al
- ITO/Alq3(200nm)/Al



**柔らかい有機分子で
ディスプレイを作ると曲げれる**

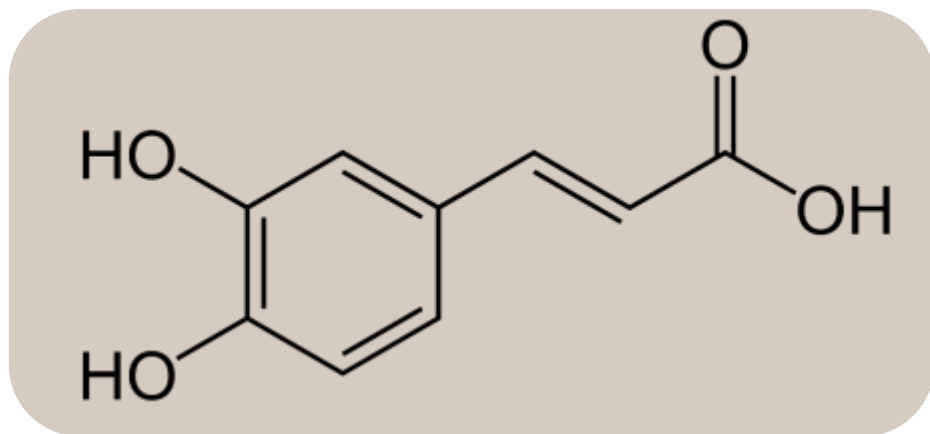
**スマートフォンを広げて
大きなディスプレイで
ゲームや映画を楽しめる**

Star WarsとCoca-ColaがコラボしたOLEDライトセイバー 46



<https://starwars.coca-cola.com.sg/galactichunt/>

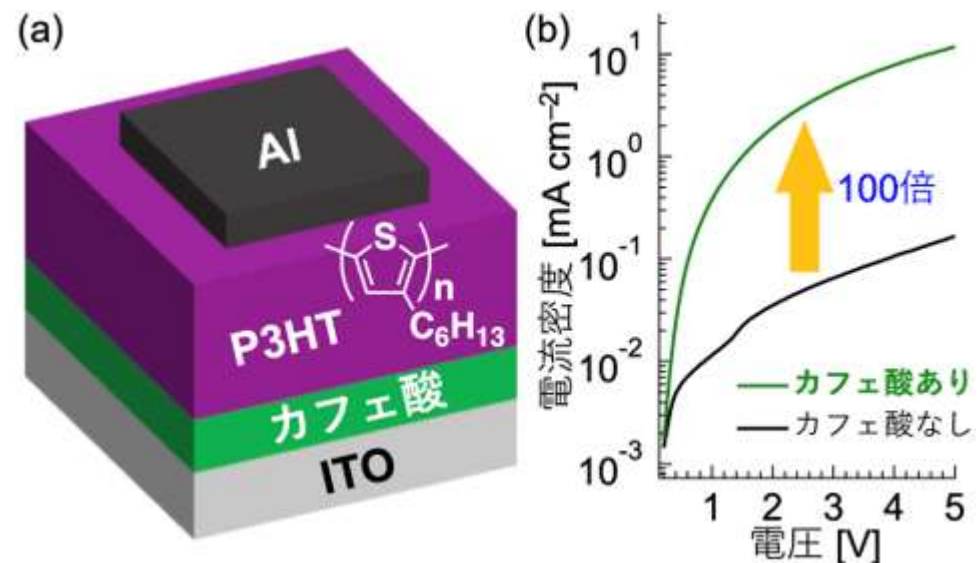
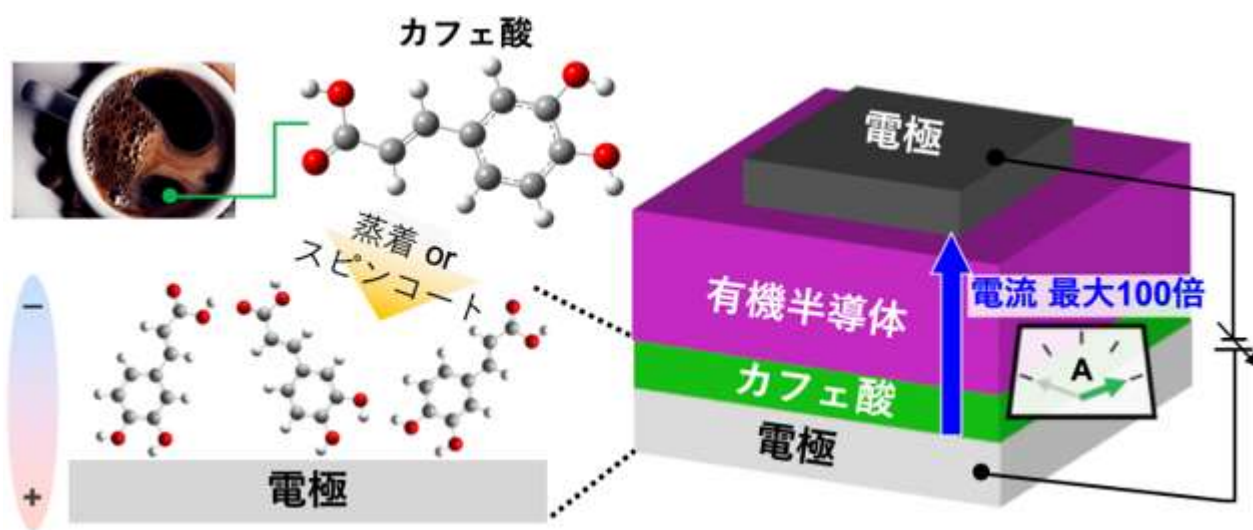




カフェ酸
(caffeic acid)

みなさんが日ごろ飲んでいる
コーヒーに含まれる分子

2022年に、産業技術総合研究所と筑波大学の研究者が、植物が作り出すカフェ酸の薄膜層を有機半導体デバイスの電極表面に形成することで、電極から有機半導体への電荷の注入効率が向上し、デバイスに流れる電流を大きくできることを発見した。



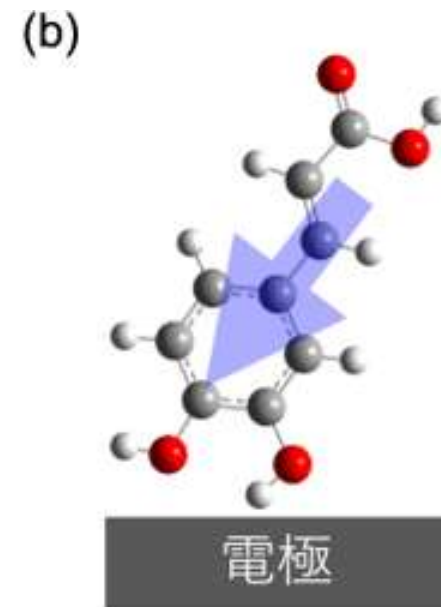
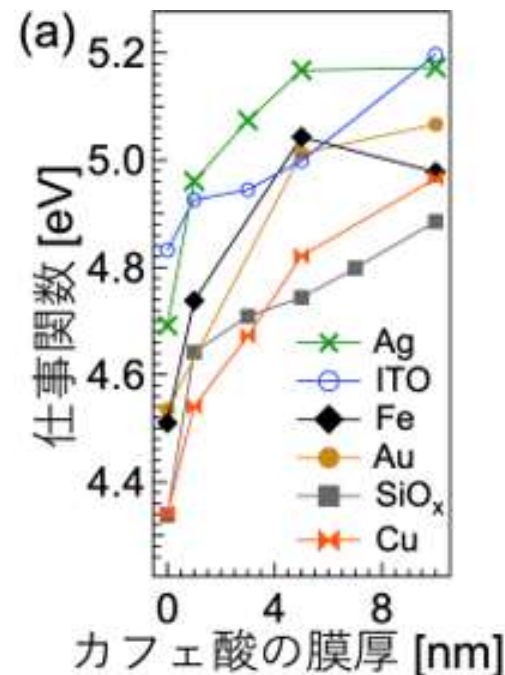
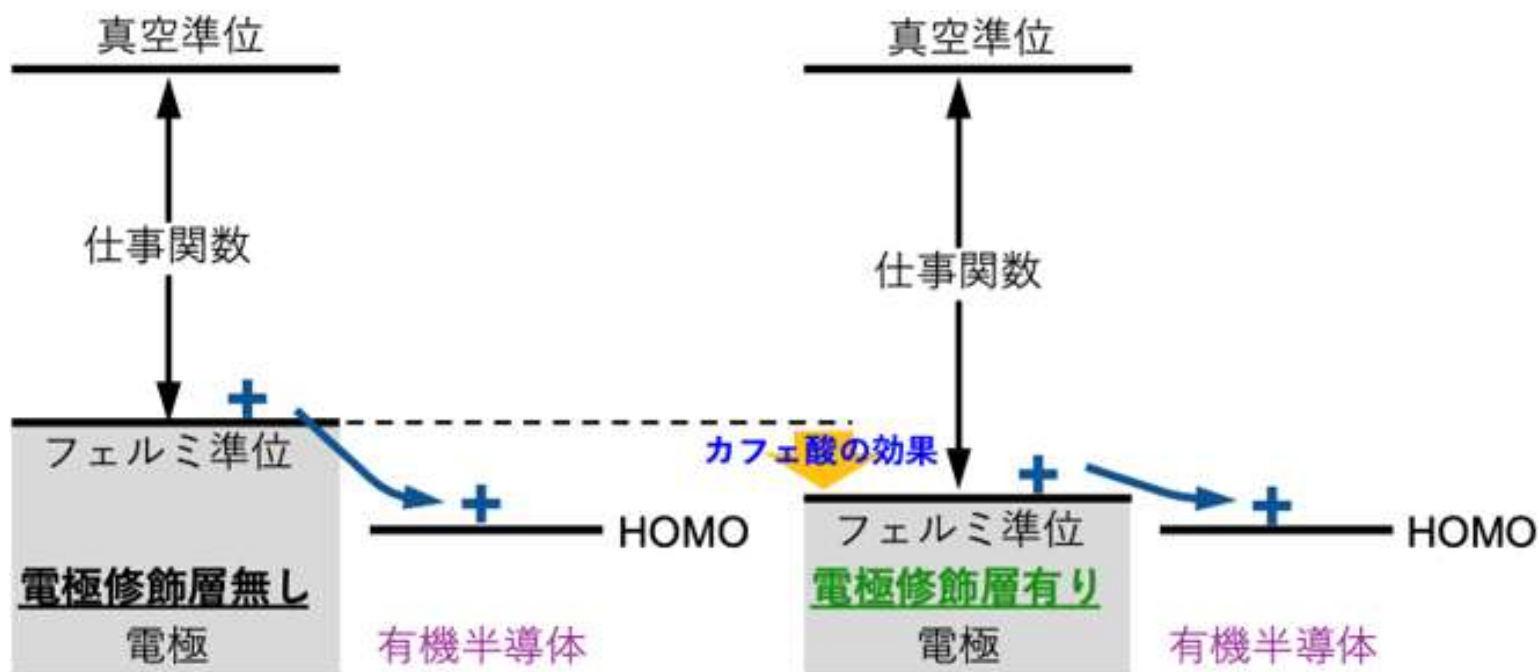
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20221203/pr20221203.html

掲載誌: *Advanced Materials Interfaces*

論文タイトル: Increasing Electrode Work Function Using a Natural Molecule

著者: Kouki Akaike, Takuya Hosokai, Yutaro Ono, Ryohei Tsuruta, and Yoichi Yamada

カフェ酸分子が自発的に向きをそろえて並び、有機半導体への電荷の注入を促進
バイオマス由来の有機半導体デバイスの実現に向けた一歩

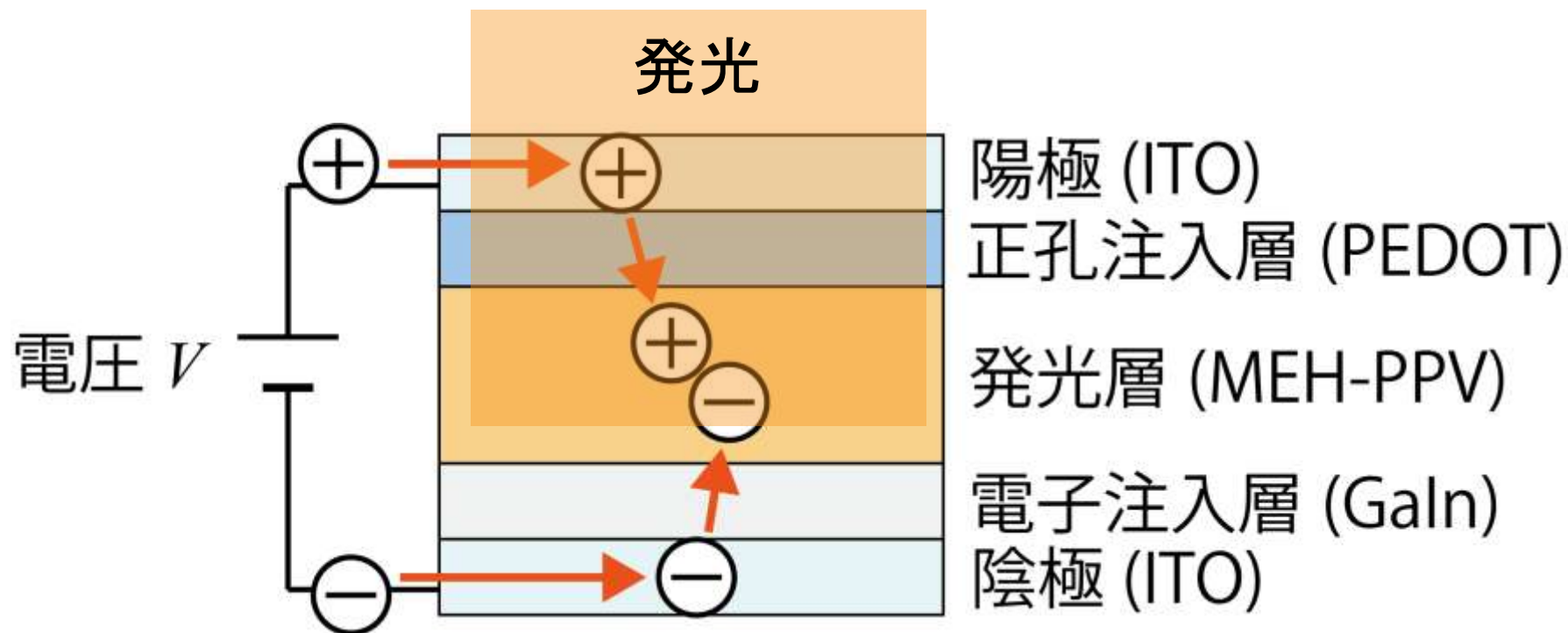


https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20221203/pr20221203.html

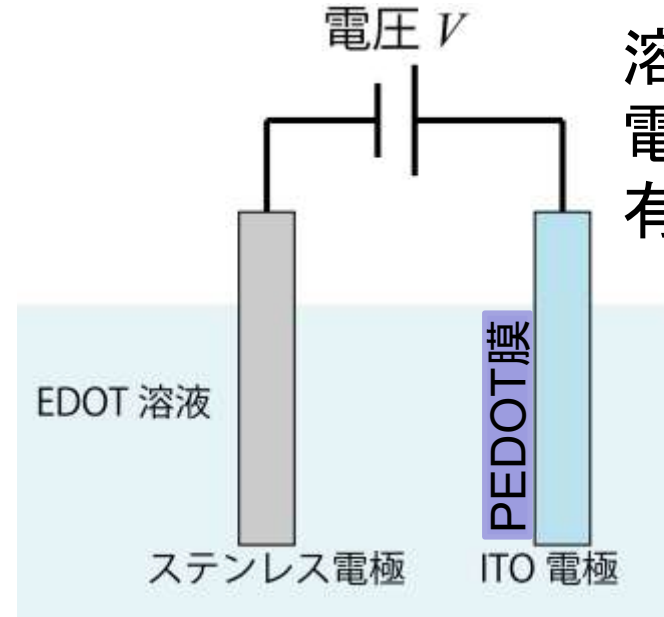
掲載誌: *Advanced Materials Interfaces*

論文タイトル: Increasing Electrode Work Function Using a Natural Molecule

著者: Kouki Akaike, Takuya Hosokai, Yutaro Ono, Ryohei Tsuruta, and Yoichi Yamada

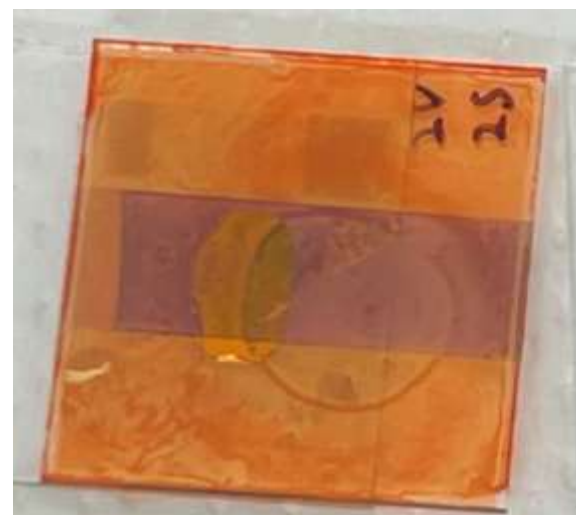
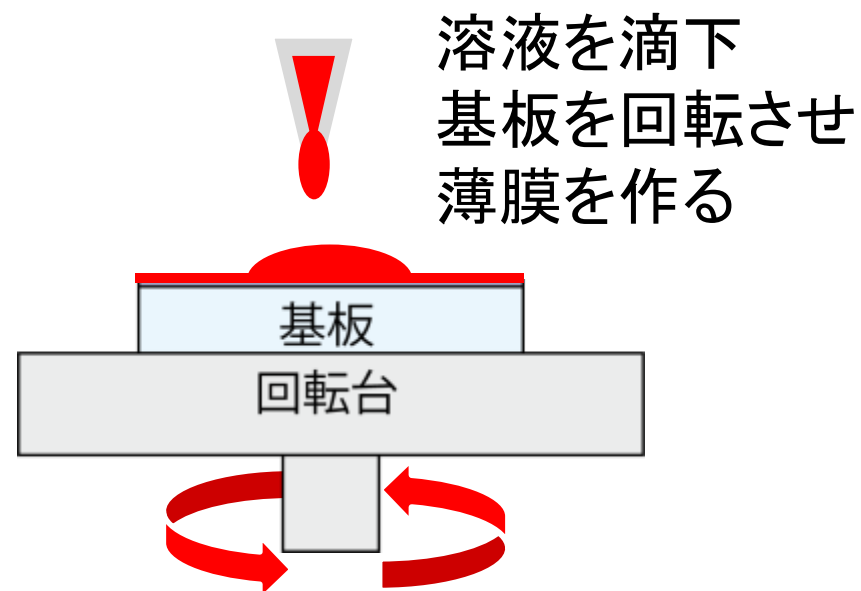
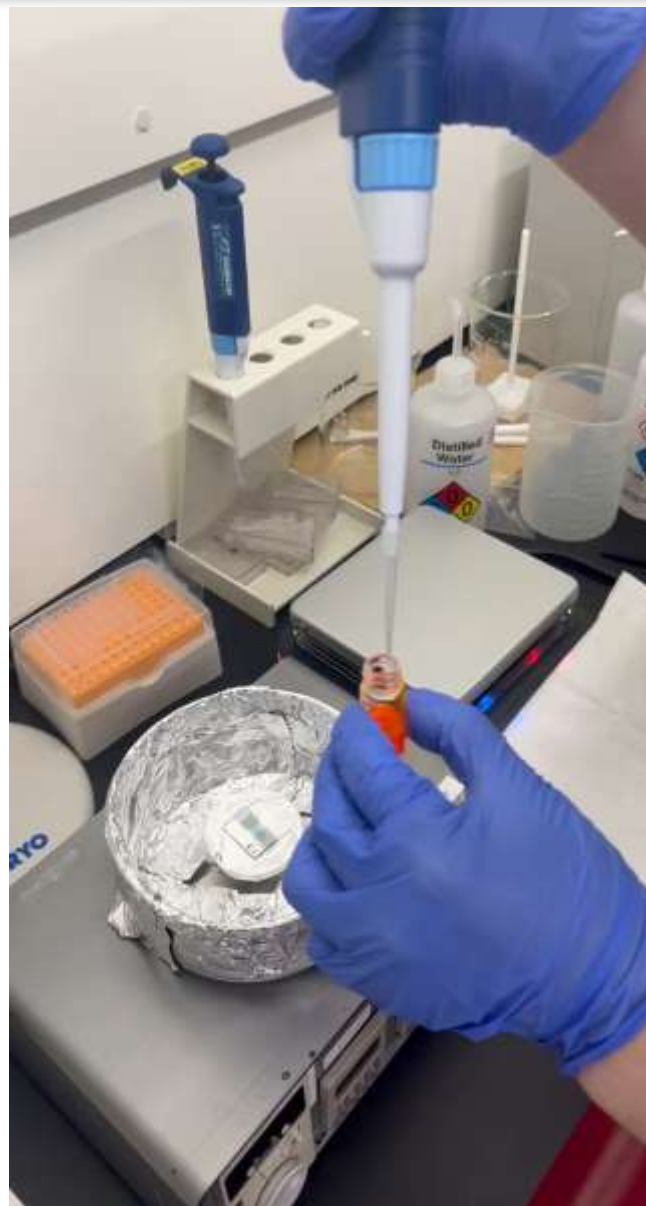


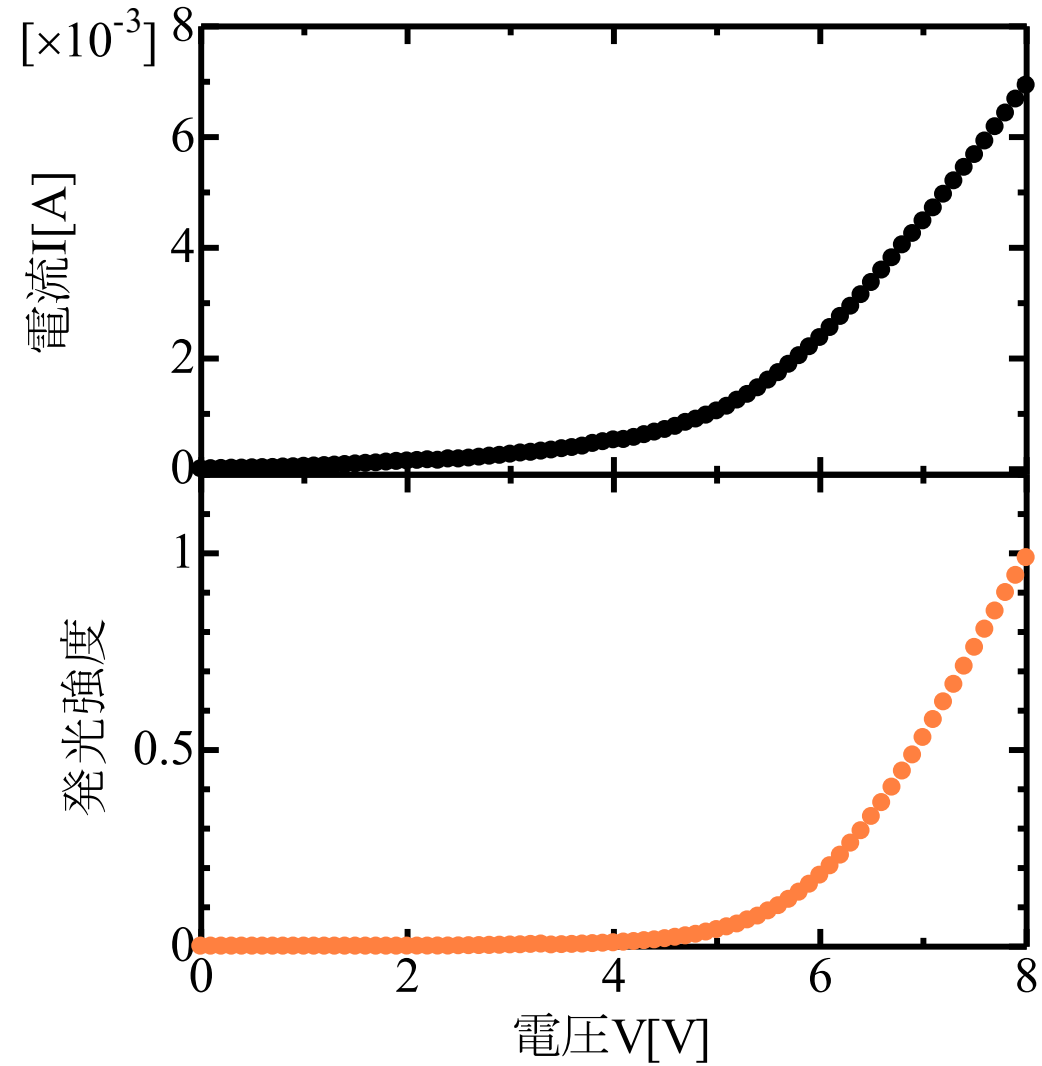
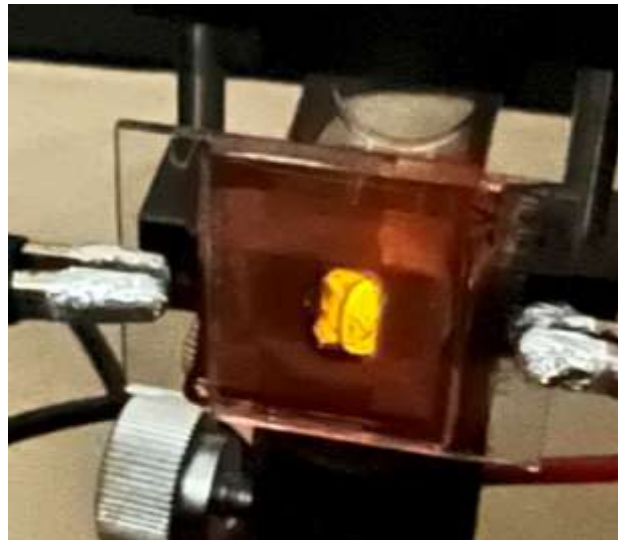
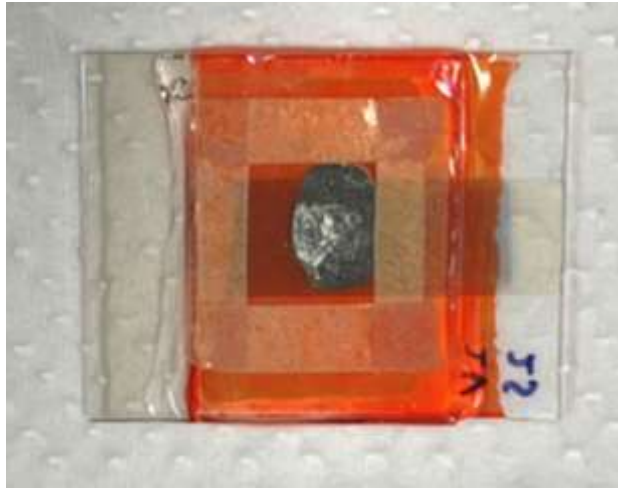
1. 電荷注入：透明電極ITOから電子や正孔が電荷注入層に注入
2. 電荷輸送：有機層内を電荷が移動
3. 再結合・発光：発光性分子で電子と正孔が再結合、
励起状態から基底状態に戻る際に発光



溶液中で
電気を流し
有機膜を作る



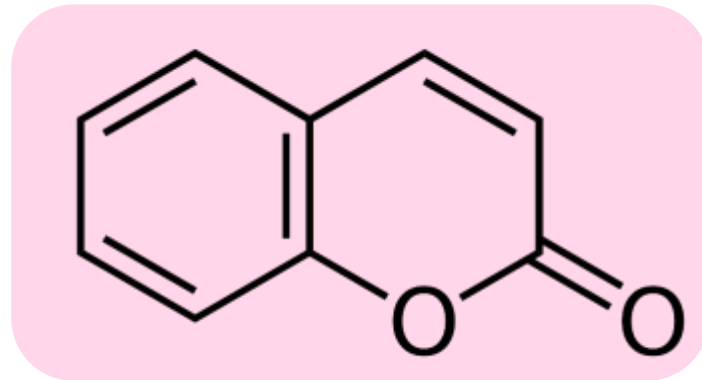




有機太陽電池



桜餅や桜の葉の塩漬けの独特な甘くかぐわしい香り

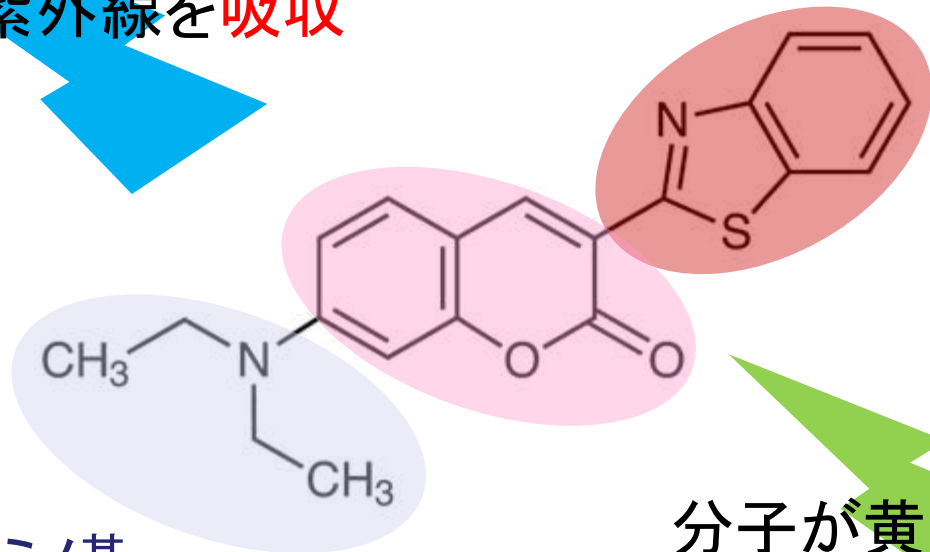


クマリン
(coumarin)

桜の葉に含まれる芳香成分「クマリン」を有機デバイスへ56

分子が紫外線を吸収

ベンゾチアゾール環
(電子受容性)

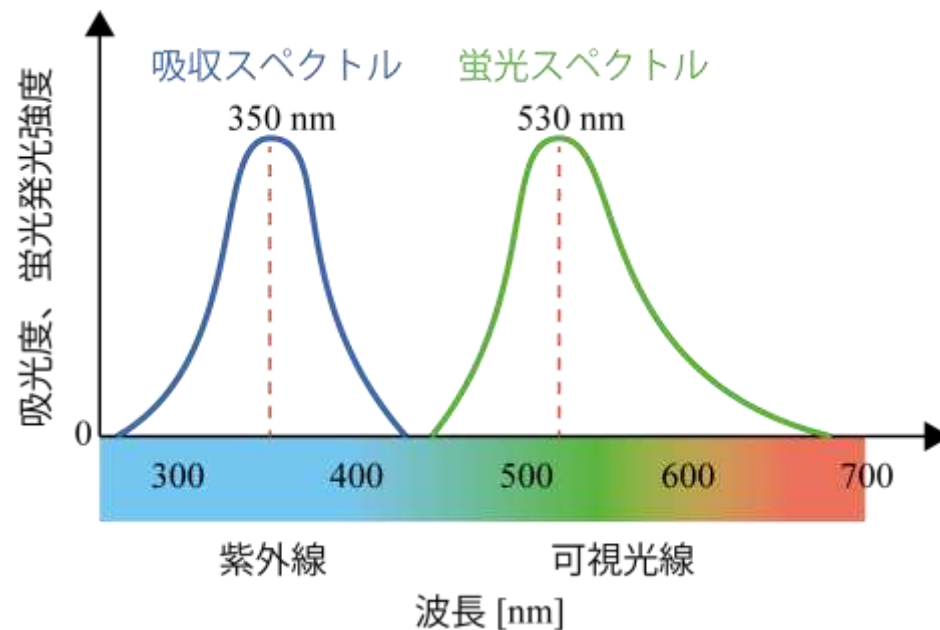


ジメチルアミノ基
(電子供与性)

クマリン 6

分子が黄緑色に発光

紫外線を吸収して可視光を取り出す
色・波長変換材料



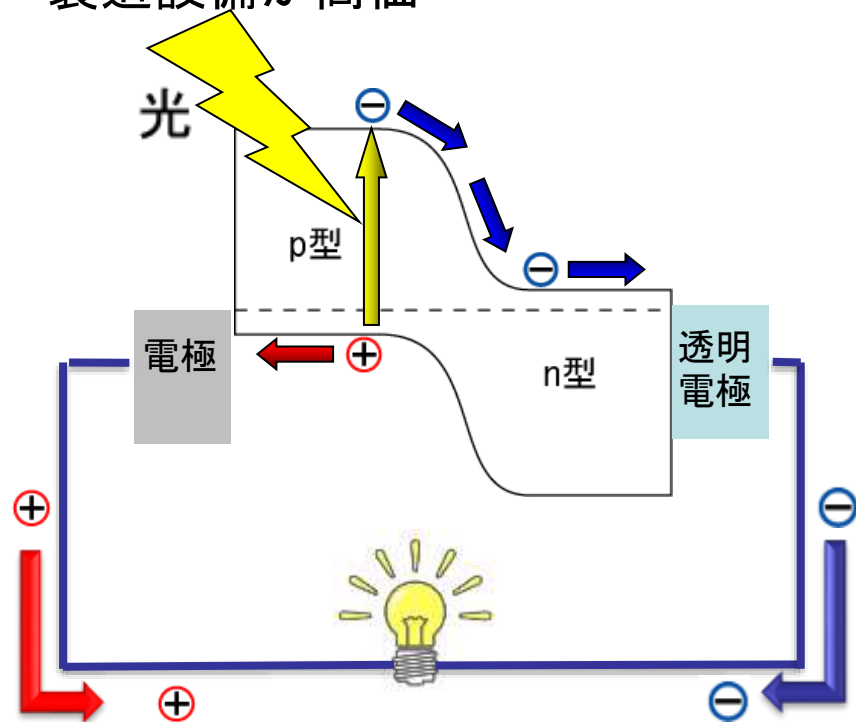
クマリン分子に電子供与基や電子受容基を付けると
電気・光学的な個性が出てくる

色・波長変換材料や有機EL素子、有機太陽電池、色素レーザー用色素として活用されている

無機太陽電池



シリコンなどの無機半導体材料を使用し発電、効率は高い
家庭用やメガソーラーに使用
製造設備が高価



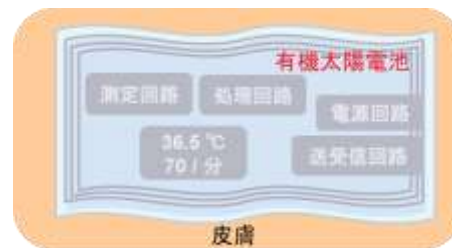
有機太陽電池



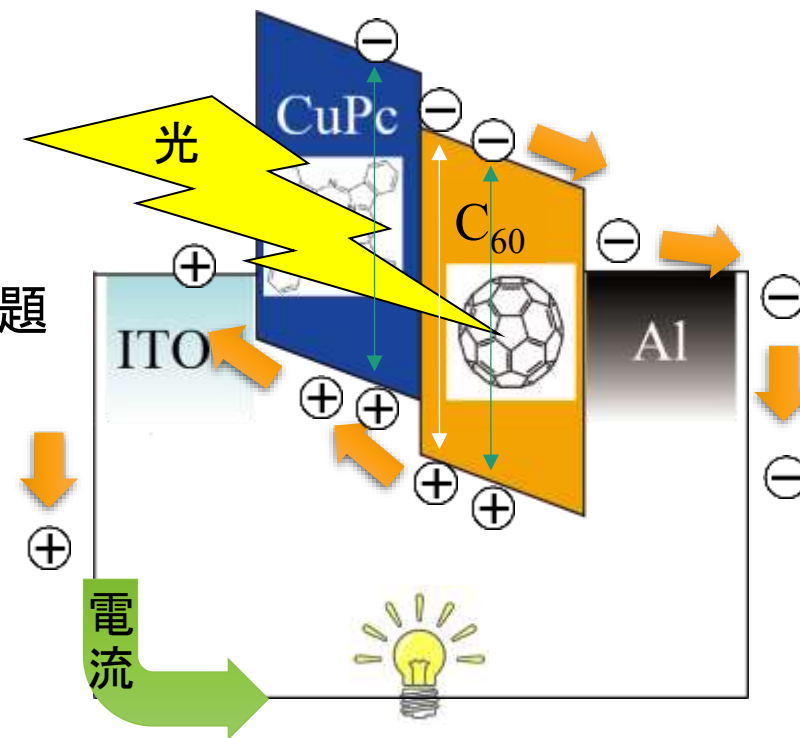
有機分子を使用して発電

Roll-to-Rollプロセスで新聞を印刷するように

大面積で軽く薄い曲がる有機太陽電池を作製できる
室内照明でも高い変換効率を出せる

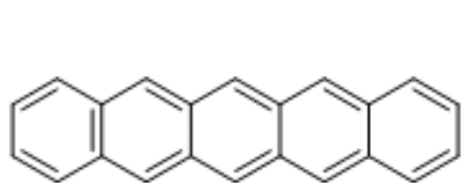
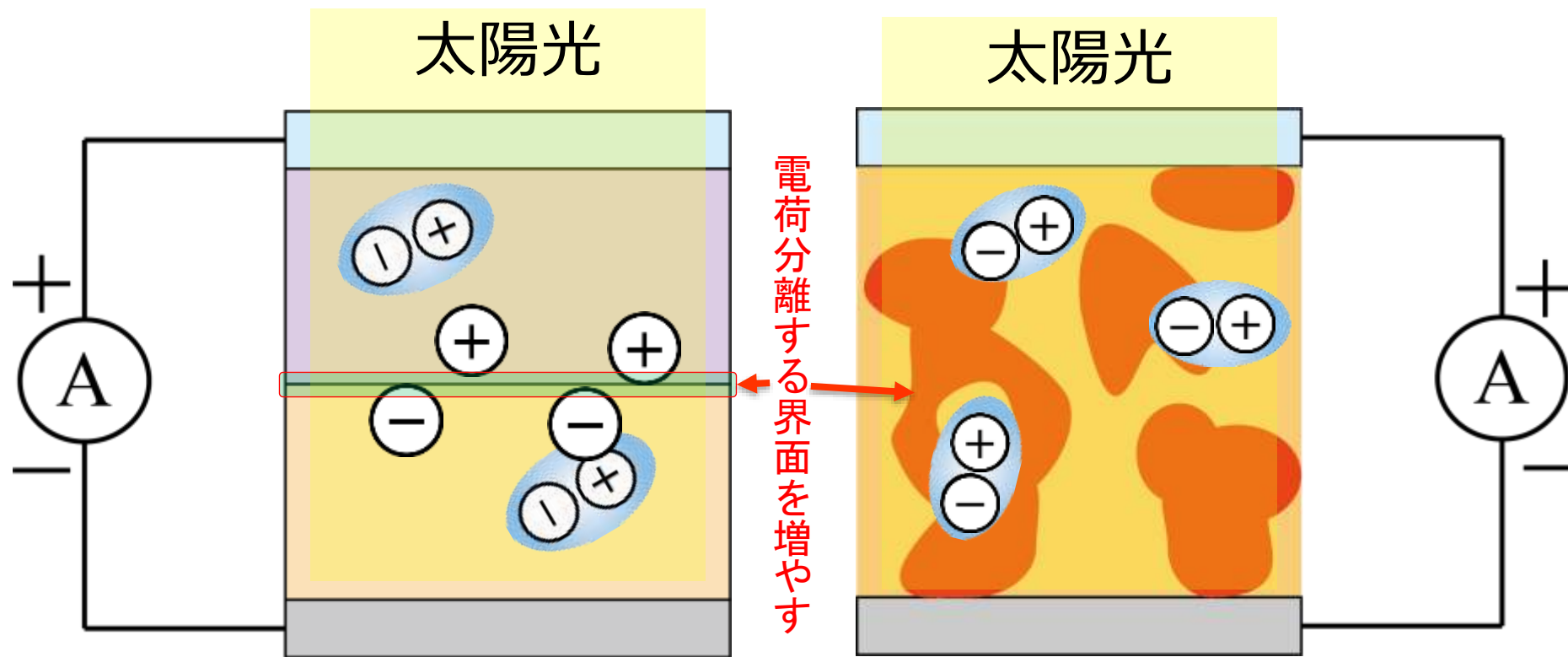


変換効率や寿命が問題



積層型

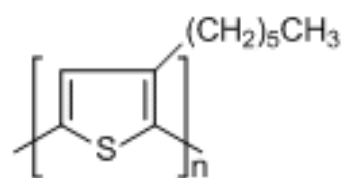
バルクヘテロ型



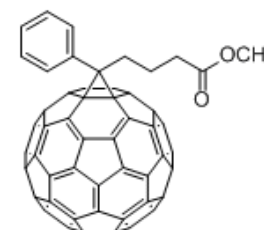
ペンタセン



フラーレン

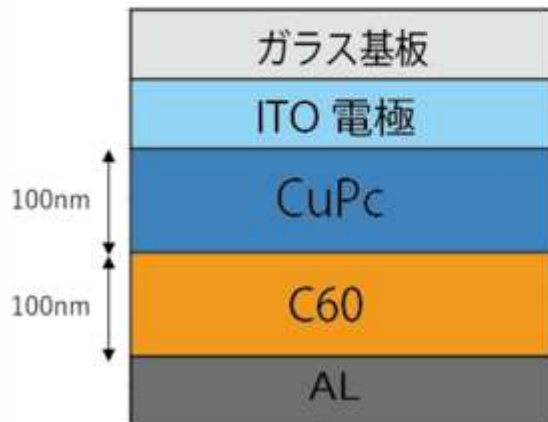


P3HT



PCBM

素子作製方法



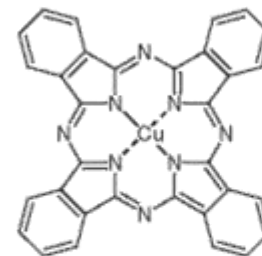
デバイスの断面図

フラーレン(C60)



炭素原子60個からなる
サッカーボール構造分子
有機太陽電池のアクセプタ
として良く用いられる

銅フタロシアニン(CuPc)

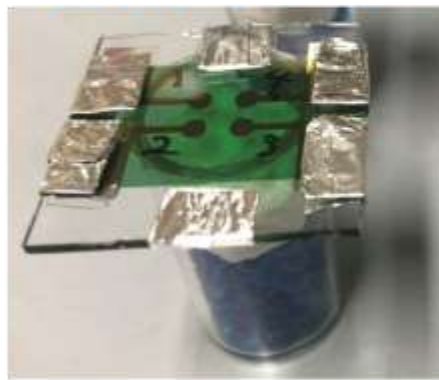


顔料としてインクに使用
レーザープリンタの感光体材料
新幹線の青色もCuPc



<https://www.jr-odekake.net/train/nozomi/>

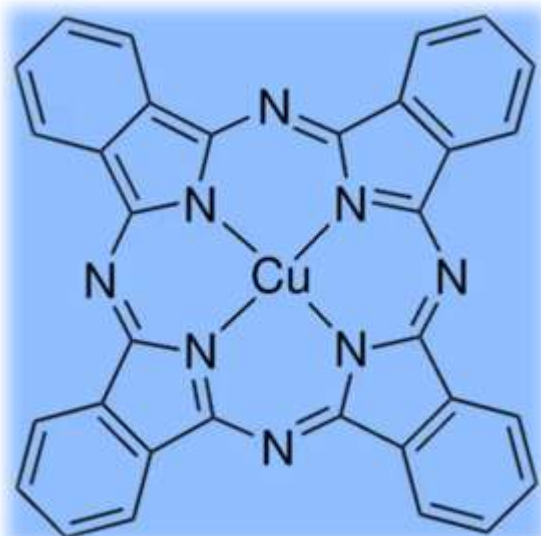
有機真空蒸着器 金属真空蒸着器 有機太陽電池



1. パターニングしたITO電極付
ガラス基板を超音波洗浄
2. CuPcおよびC60を順番に有機
真空蒸着器で成膜
3. 金属蒸着器でAl電極を成膜
4. ガラス瓶にシリカゲルを入れて
エポキシ接着剤で封止

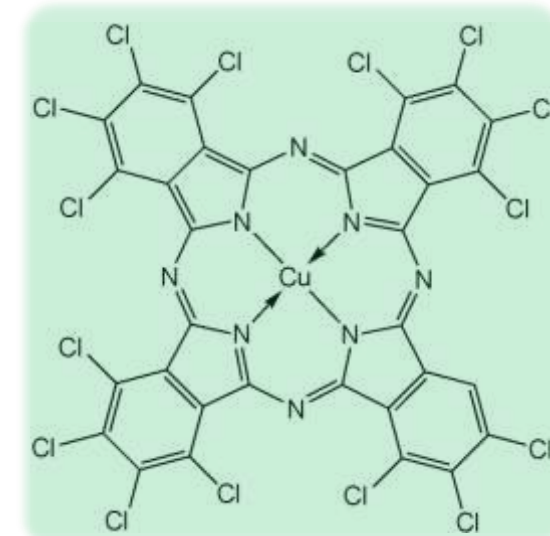
絵具

銅フタロシアニン(CuPc)

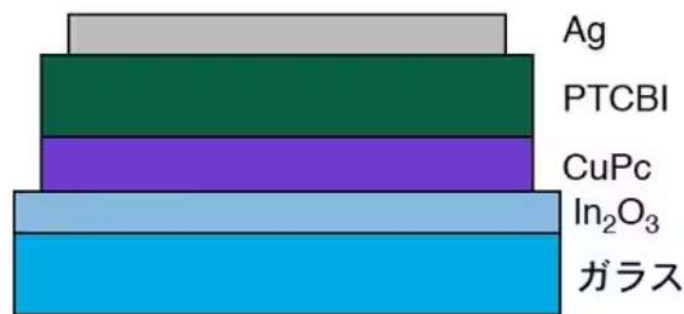


1986年、C.W.Tangが、有機電子供与体(有機p型半導体CuPc)と有機電子受容体(有機n型半導体PTCBI)を接合したヘテロ接合(p-n接合)型太陽電池を報告

フタロシアニングリーン

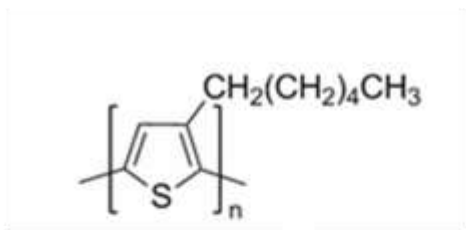


東海道新幹線の青色

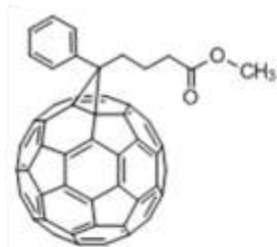


東北新幹線の緑色

作製方法



P3HT(p型) 25mg



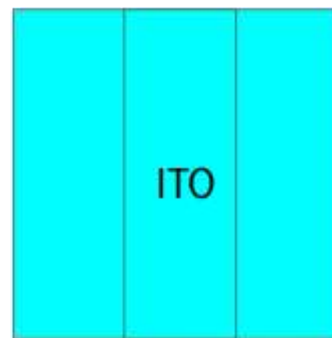
PCBM(n型) 23mg

クロロホルム(800 μ l)にP3HTとPCBMを入れて攪拌する



マグネスティックステイラー

攪拌条件
・回転数：1000rpm
・温度設定：60 $^{\circ}$ C



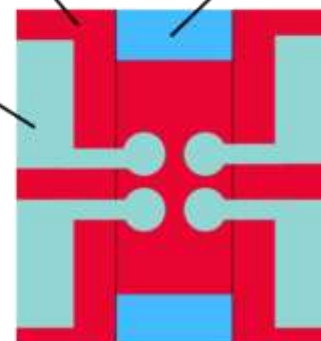
ITOガラス基板にUV-オゾン洗浄で表面処理をしてスピコーターにセットする



塗布条件
・溶液から100 μ l取り出しITOガラス基板に滴下する
・20秒間2000rpmで製膜する

P3HT/PCBM ITOガラス

Al電極



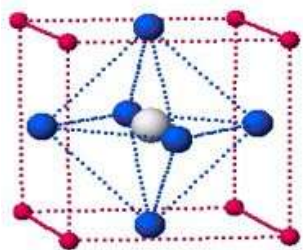
金属蒸着器を用いてAl(100nm)を蒸着



唐辛子の辛み成分「カプサイシン」で太陽電池の効率UP 66

ペロブスカイト太陽電池

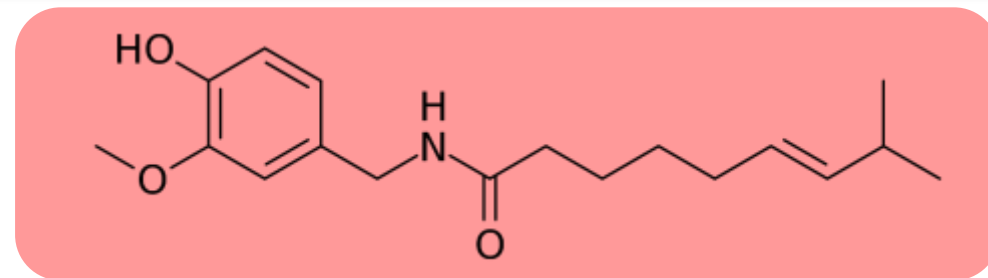
ペロブスカイトと呼ばれる結晶構造の材料を用いた新しいタイプの太陽電池



- NH_3CH_3^+
- Br or I⁻
- Pb^{2+}



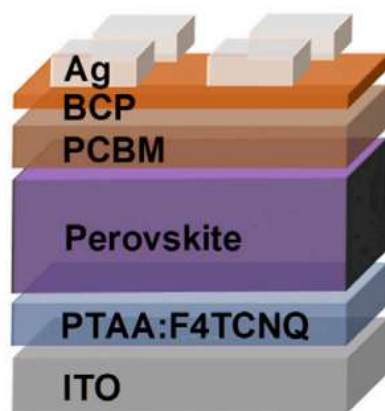
<https://www.jst.go.jp/seika/bt107-108.html>



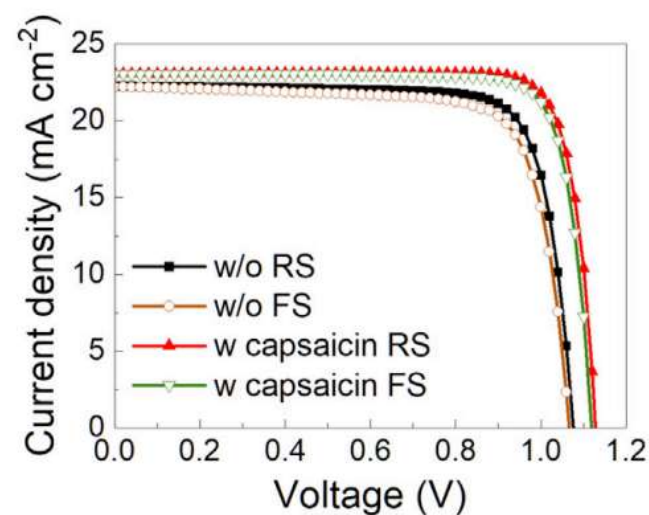
カプサイシン (capsaicin)

中国の研究グループが、唐辛子の辛み成分であるカプサイシンをペロブスカイト層に混ぜることで、太陽電池の変換効率が高くなったことを報告

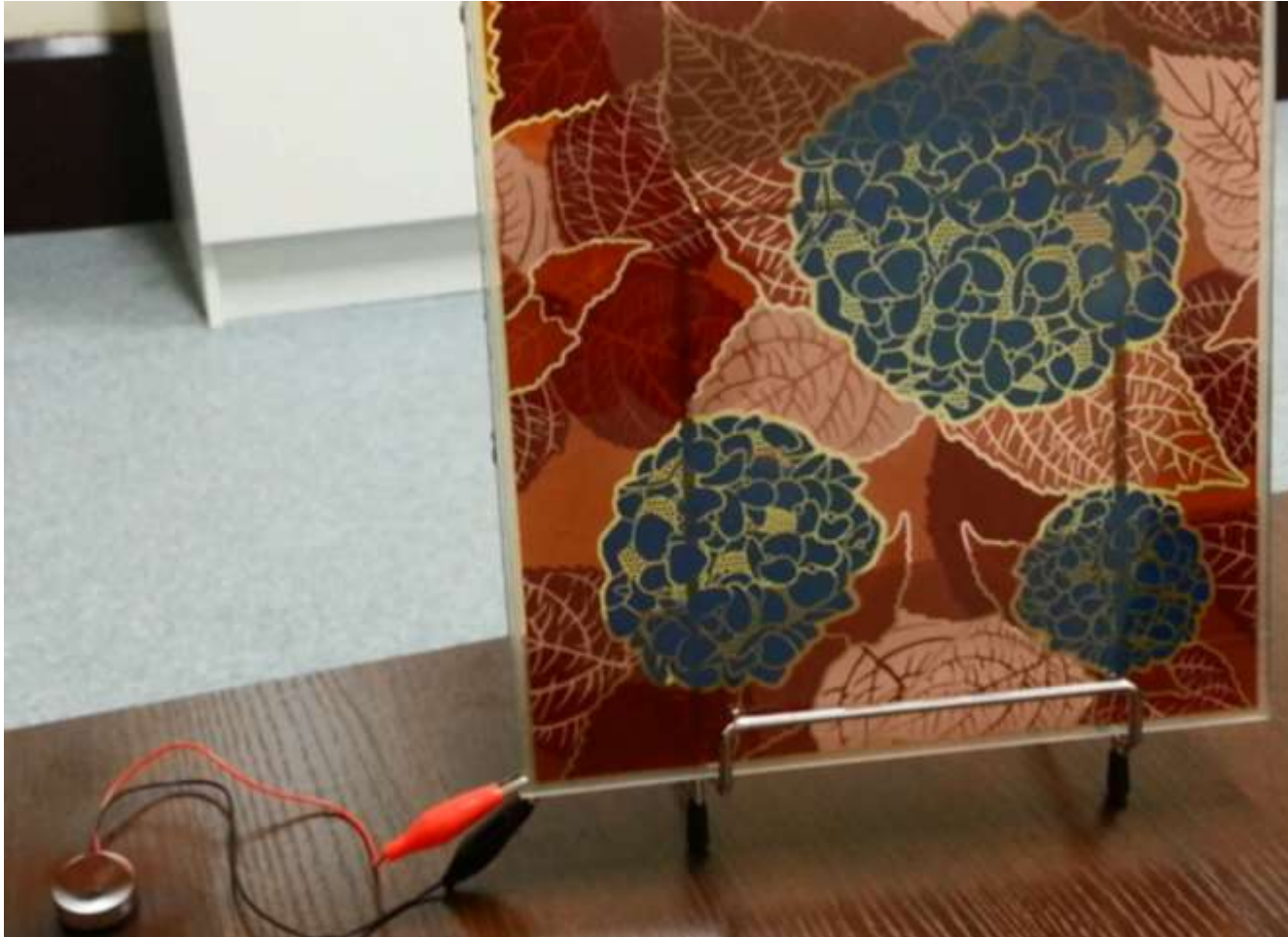
A



B



Xiong et al., Joule 5, 467–480(2020)

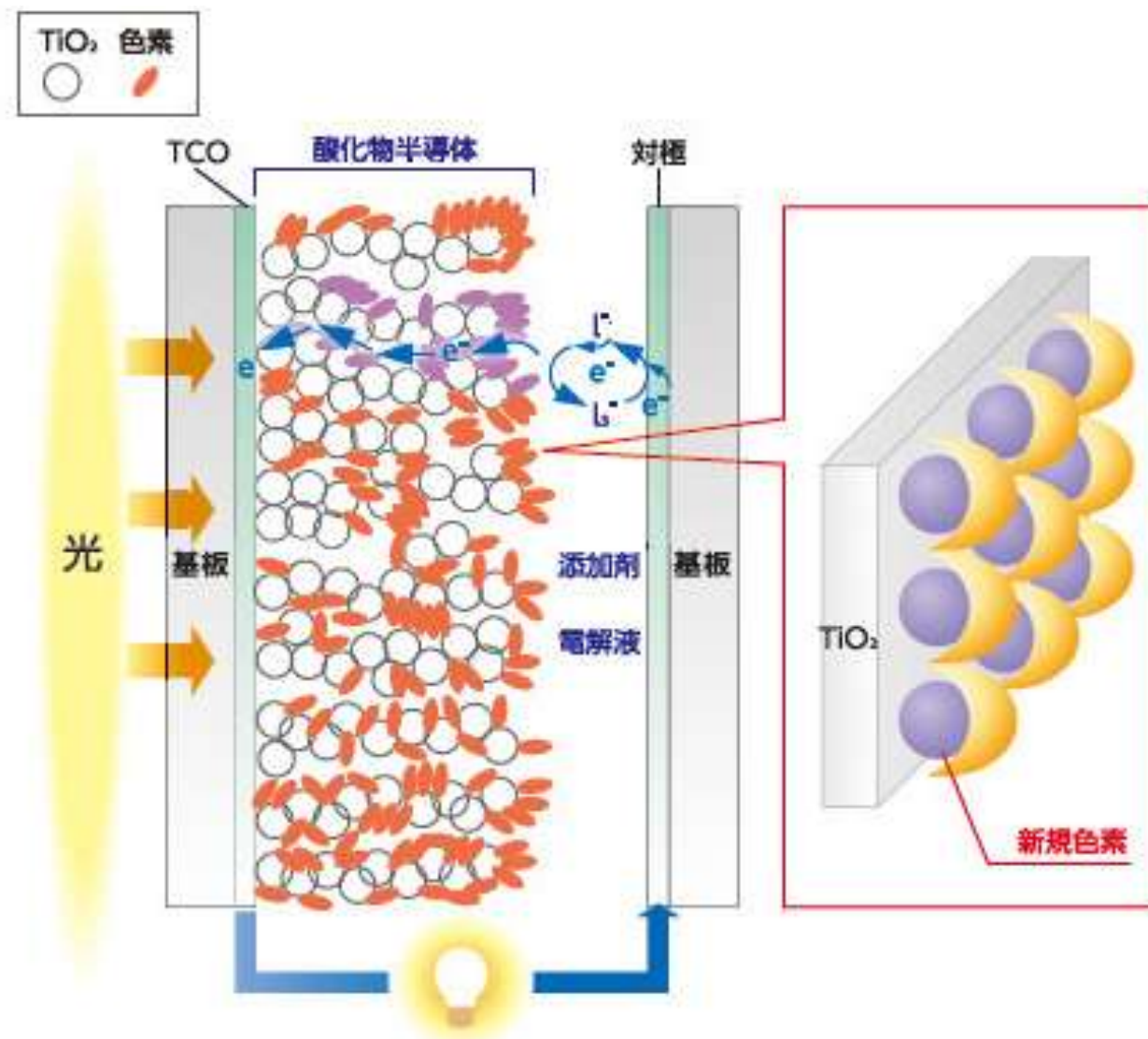


一見ステンドグラスのようなガラスなのに、
発電もできて蓄電もできる

色素増感太陽電池の動作原理

70

- 太陽光が当たると、電池の中の色素分子が光を吸収し、基底状態の電子が励起状態へと遷移し、光エネルギーを蓄える
- 色素の励起状態の電子が酸化チタン多孔質膜へと注入、酸化チタンの伝導帯を通過して電子が透明電極、外部回路へと流れる
- その後、電子は対極へと流れ、対極表面付近で電解液中の I_3^- を I^- に還元する
- I^- は電解液の中で拡散し、酸化された色素を還元し、元の色素へと再生する
- このサイクルが繰り返し回ることで、光エネルギーが電力に変わる



① 酸化チタンペースをつくる



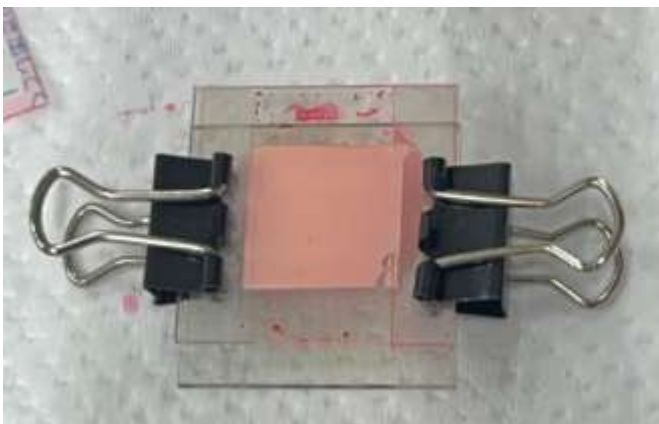
② ITOガラス基板に酸化チタンペースを塗って焼く



③ 色素溶液を準備



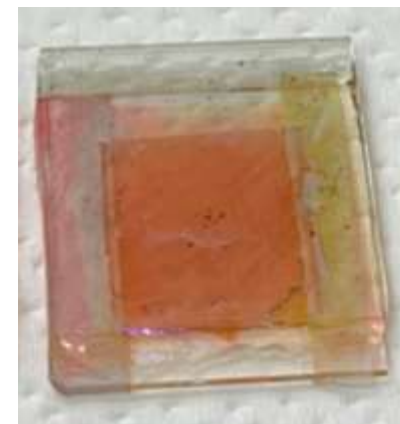
④ 酸化チタン膜に色素を染込ませる



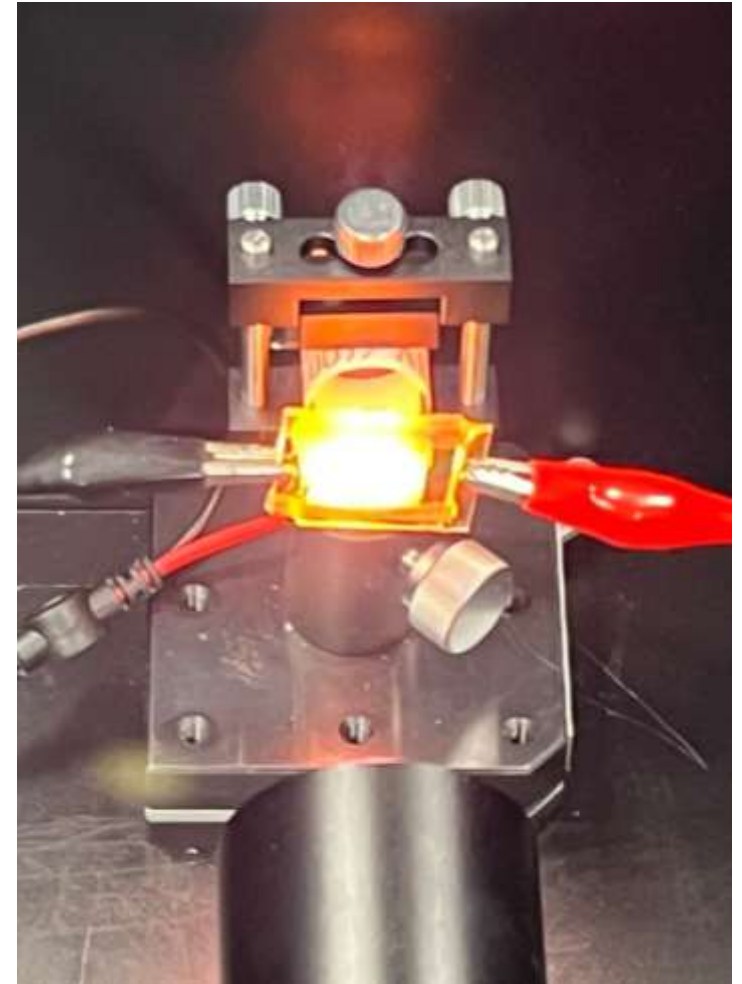
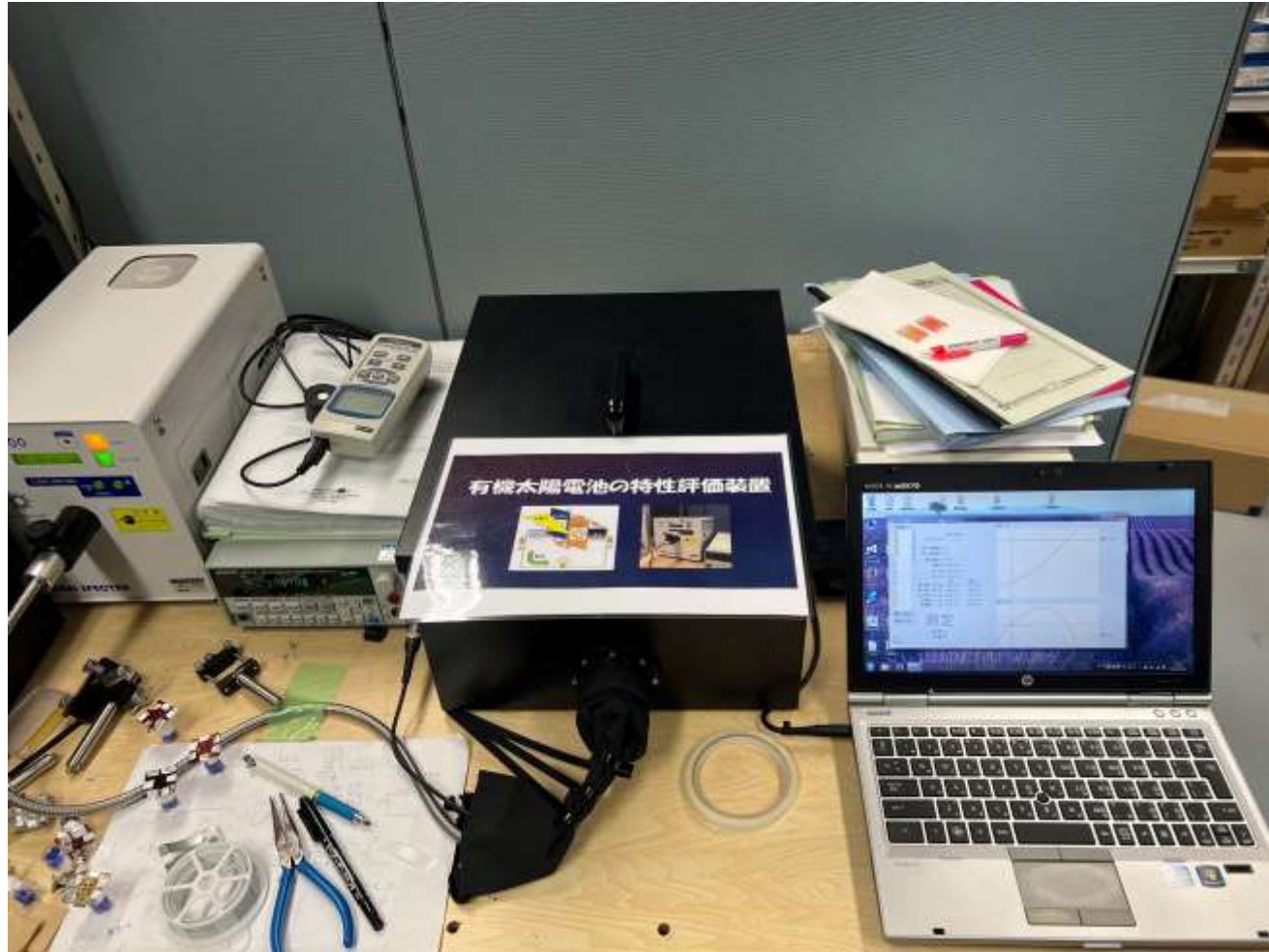
⑤ ヨウ素液を注入

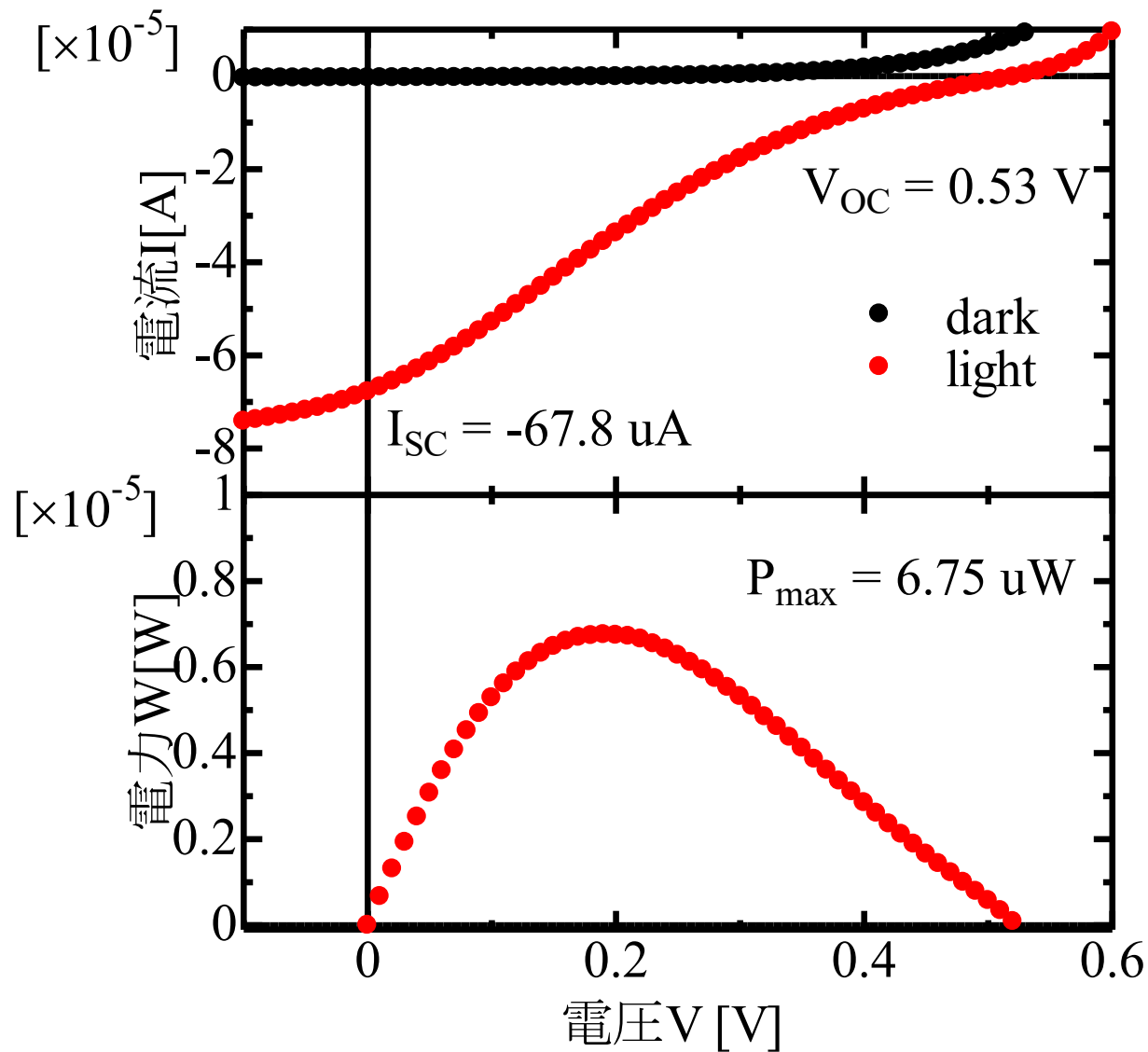


⑥ 封止して完成



ソーラーシミュレーターで太陽電池の特性を測る 72





2025/5/6
色素増感太陽電池
色素:エオシンY
サンプルC

色素増感太陽電池の動作概念図(エネルギー)

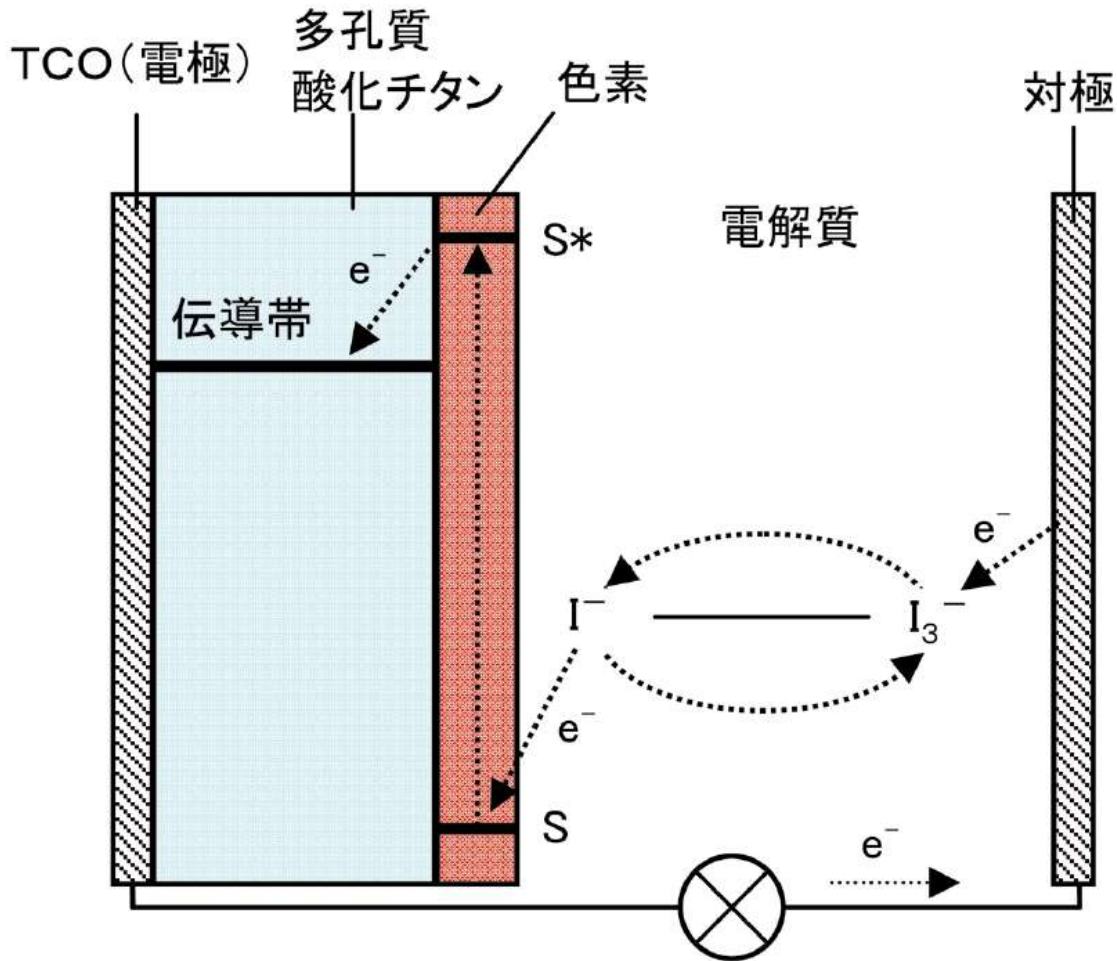


図4 色素増感太陽電池の動作概念図

太陽光を吸収した色素では、電子が励起され、その電子は 10^{-12} 秒の時間オーダーで酸化チタンの伝導帯に注入され、外部回路へと運ばれます。

酸化された色素は、電解質 (I⁻) から電子を受け取り基底状態の色素に戻ります。

一方、色素で酸化された電解質 (I₃⁻) は対極まで拡散し、対極から電子を受け取り還元状態の電解質 (I⁻) に戻ります。

色素増感太陽電池には
上記の酸化還元反応を担う物質が必要

透明醤油を電解質として利用したケースでも
何かしらの物質が酸化還元反応を担っているはず。

メラノイジンではないかと推測



うすくちや白だしにもまして白醤油でもできない、
素材の色を最大限に生かすことのできる醤油。
塩だけでは物足りない味付けも
醤油の風味が加わることでぐんと美味しさが増す。
そんな特別でちょっと不思議な醤油を
150年の節目の年にご提案いたします。
フンドーダイ「透明醤油」

特別でちょっと不思議なおしょうゆ。

透明醤油



電解質であれば良いと考えると身近な醤油も食塩が入っているため機能するのでは？

また、色素の綺麗な色を従来のヨウ素液では変色してしまい見た目がきれいな色素増感太陽電池が作れない。

色素増感太陽電池を作ってみたら、発電していた！

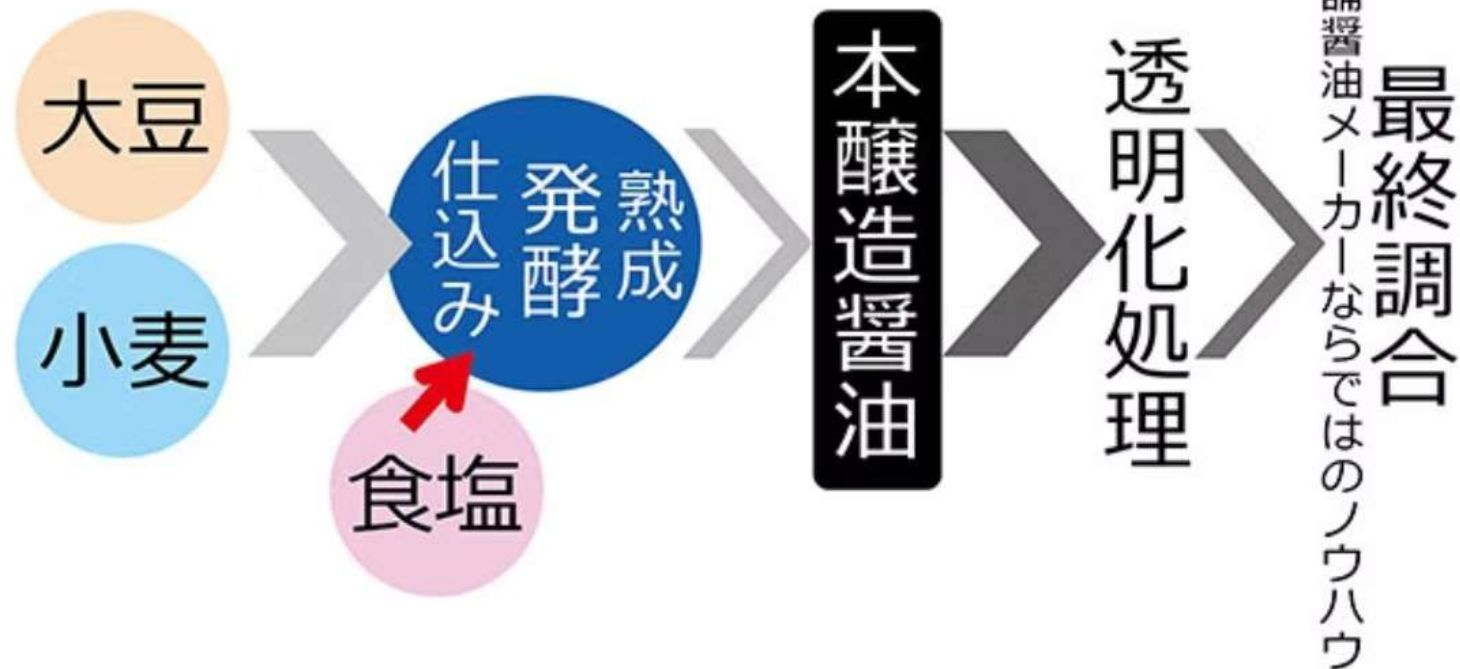
なぜ発電するのは不明

透明醤油の製造方法

まずは、

通常の濃口醤油を製造していきます。

本醸造醤油からつくります。



透明醤油は、しっかりと生揚げ醤油をつくり、
特殊技術による透明化处理をして、最終的に美味しい醤油へ調合して完成します。

醤油が黒い理由とアミノカルボニル（メイラード）反応

アミノカルボニル（メイラード）反応とは、食品に含まれている「アミノ化合物」と「還元糖」を加熱または合わせて保存することにより、結合・分解・酸化などの複雑な反応を繰り返して、茶褐色の物質「メラノイジン」ができる現象をいう。

ケーキのスポンジやタルト、パイ、シュー、クッキー生地などを焼成したときの「焼き色」がアミノカルボニル（メイラード）反応によりできたもの。

材料の小麦粉・バター・卵・砂糖に含まれるタンパク質やアミノ酸などの「アミノ化合物」と、糖分に含まれる「還元糖」が加熱（160℃以上）されることにより、アミノカルボニル（メイラード）反応がおこり、茶褐色の物質「メラノイジン」ができて、焼き色になる。

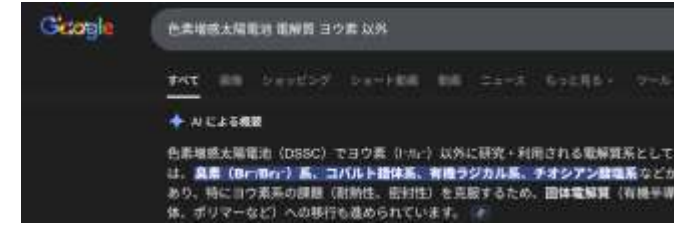
また、アミノカルボニル（メイラード）反応は色が変わるだけでなく、アミノ酸の種類と加熱温度により特有の香気成分も生成される。

スポンジやタルト生地などを焼いた時の芳ばしい香りも、アミノカルボニル（メイラード）反応によるもの。



ヨウ素系以外の電解質ってあるの？

色素増感太陽電池（DSSC）でヨウ素（ I^-/I_3^- ）以外に研究・利用される電解質系としては、臭素（ Br^-/Br_3^- ）系、コバルト錯体系、有機ラジカル系、チオシアン酸塩系などがあり、特にヨウ素系の課題（耐熱性、密封性）を克服するため、固体電解質（有機半導体、ポリマーなど）への移行も進められています。



臭素（ Br^-/Br_3^- ）系:

ヨウ素系と同様に酸化還元対（レドックス対）を利用しますが、臭素イオンの方が安定性が高く、長期信頼性向上が期待されます。

コバルト錯体系:

ヨウ素系に比べ、電子の注入・再生サイクル（再酸化）効率が高く、開放電圧（ V_{oc} ）の向上や、ヨウ素分子の拡散による対極触媒（白金）の被毒を抑制できるため、高性能化・高信頼化が期待されています。

有機ラジカル系（TEMPOなど）:

ラジカル化合物をレドックス対として利用し、ヨウ素系のような腐食性の問題がなく、毒性も低いことから環境負荷低減に貢献します。

ラジカル化合物が醤油に入っていないか？

チオシアン酸塩（ SCN^-/SCN_2 ）系:

ヨウ素系に代わる低コストで安定な電解質として注目され、特に低コスト化を目指す研究で用いられます。

固体電解質（有機半導体、ポリマーなど）:

液漏れや密封（封止）の問題を根本的に解決し、電池の耐久性や屋外での長期使用を可能にするため、非常に有望視されています。ヨウ素系電解液を固体化する研究も進んでいます。

The Contribution of Melanoidins to Soy Sauce Antioxidant Activities and Their Structure Characteristics

by Hanhan Li , Yaqiong Zhang , Zhi-Hong Zhang , Feng Wang , Baoguo Xu , Zhankai Zhang , Haile Ma  and Xianli Gao* 

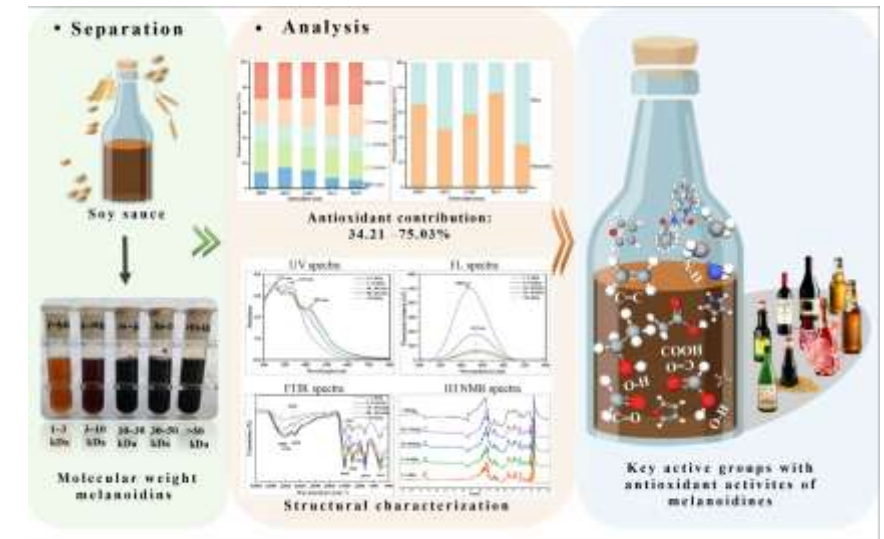
School of Food & Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

* Author to whom correspondence should be addressed.

Foods 2025, 14(16), 2787; <https://doi.org/10.3390/foods14162787>

Submission received: 24 June 2025 / Revised: 1 August 2025 / Accepted: 5 August 2025 /

Published: 11 August 2025



醤油には、**高い抗酸化作用を持つラジカル捕捉化合物が豊富に含まれています**。これらの化合物の主なものは**メラノイジンと呼ばれる褐色色素であり、醤油の醸造・熟成過程で生成されます**。

醤油とラジカル化合物

メラノイジン: 醤油の主成分であるアミノ酸と糖がメイラード反応（非酵素的褐変反応）を起こすことで生成される高分子の褐色色素です。このメラノイジンが、**醤油の持つ強力な抗酸化活性の主要な要因**であることが研究により示されています。

ラジカル捕捉能力: 醤油は、酢や他の発酵食品よりもはるかに高いフリーラジカル（活性酸素種など）消去能力を示します。特に濃口醤油は、赤ワインの約10倍の抗酸化活性を持つことが報告されています。

他の抗酸化物質: メラノイジンの他に、遊離アミノ酸、ペプチド、イソフラボン、フェノール酸、マルトールなどの化合物も抗酸化特性に寄与しています。

<https://www.mdpi.com/2304->

[8158/14/16/2787#:~:text=High%20molecular%20weight%20melanoidins%20in,/100%20mL%20%5B21%5D.](https://www.mdpi.com/2304-8158/14/16/2787#:~:text=High%20molecular%20weight%20melanoidins%20in,/100%20mL%20%5B21%5D.)

—基礎科学から医学・医療を見る—

活性酸素と抗酸化物質の化学

中村 成夫

日本医科大学基礎科学化学

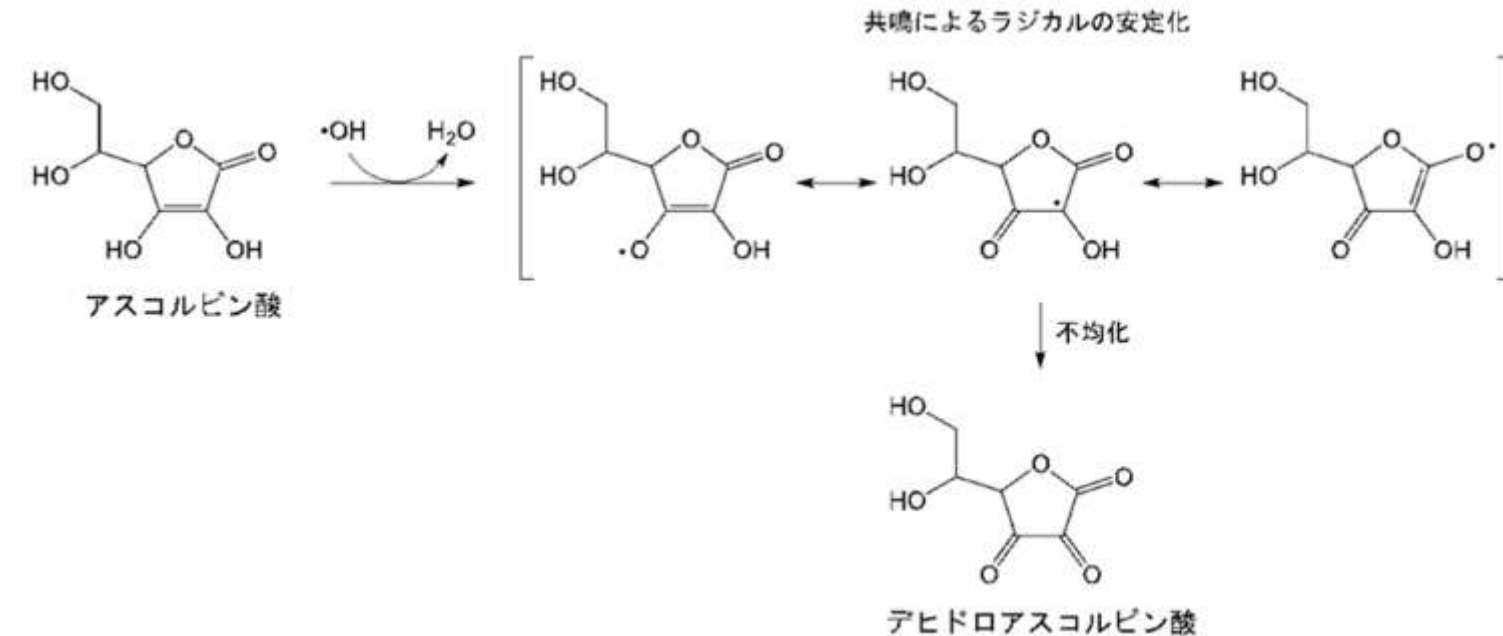


Fig. 3 アスコルビン酸 (ビタミンC) の抗酸化機構

天然には抗酸化作用を有する低分子化合物が数多く存在する。生体はこれらを生合成したり，食物から取り込むことによって，活性酸素による酸化傷害から生体を防御している。

天然に存在する抗酸化物質としてもっともよく知られているものがアスコルビン酸（ビタミンC）である。アスコルビン酸は，活性酸素に電子を1つ渡すと自らはラジカルとなるが，このラジカルはFig.3に示すように共鳴により安定化される。

このようなラジカル安定化が，ほかの分子を次々とラジカルにしていくような連鎖反応を防ぐとともに，自らは不均化してデヒドロアスコルビン酸となる。

このような抗酸化作用からアスコルビン酸は食品添加物として広く使用されている。

メイラード反応と着色・褐変糖とアミノ酸が反応すると茶色くなる化学

村田 容常

お茶の水女子大学基幹研究院自然科学系

Published: 2019-04-01

メイラード反応によるメラノイジンと低分子色素の形成

図1にグルコースとアミノ酸とのメイラード反応のアウトラインを示す。グルコースのカルボニル基がアミノ基に求核付加し脱水するとシッフ塩基が形成される。シッフ塩基の二重結合が転移したものがアマドリ化合物である（初期段階）。中期段階ではアマドリ化合物から3-デオキシグルコソンなどの種々のカルボニル化合物が形成される。後期段階ではこれらの反応の中期段階で生じたさまざまなカルボニル化合物とアミノ酸が反応して色素や香り成分などが形成され、着色・褐変する。

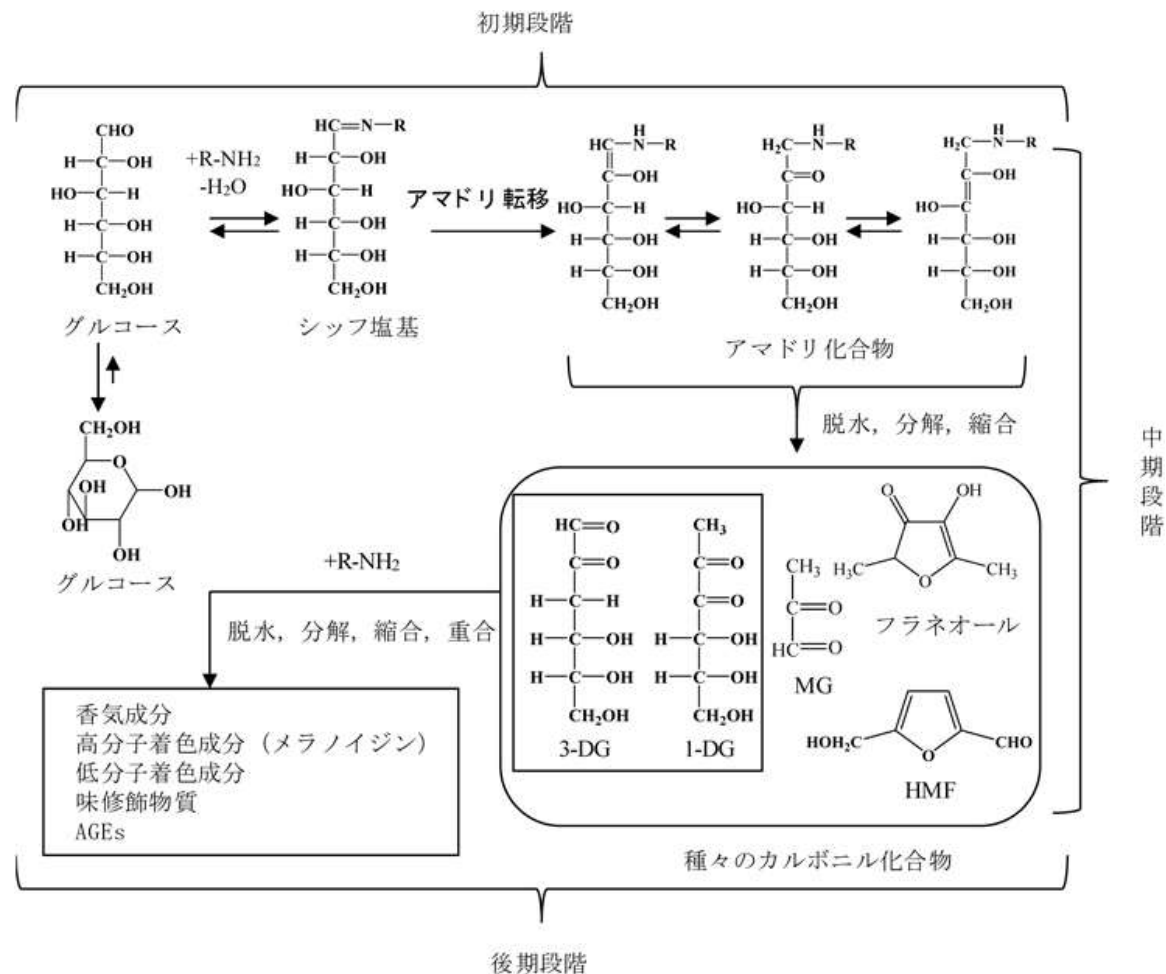


図1■グルコースとアミノ酸 (R-NH₂) とのメイラード反応のアウトライン
 3-デオキシグルコソン (3-DG), 1-デオキシグルコソン (1-DG), 5-ヒドロキシメチルフルフラール (HMF), メチルグリオキサール (MG), Advanced glycation end products (AGEs) .

表1にメイラード反応で形成される色素もしくは着色成分を分子量で大別し低分子色素と高分子色素（メラノイジン）の特徴を対比した。低分子色素は、化学構造の解析が可能であるということで分子量が1,000～2,000以下の分子とした。メラノイジンもタンパク質を基質としない場合は、分子量は1,000以下であるという考え方もある⁽¹⁾が、ここでは分子量1,000～2,000以上のものを高分子色素とする。高分子色素はメラノイジンということになるが、高分子といっても生体高分子であるタンパク質や多糖とはかなり異なる。タンパク質ではアミノ酸が、多糖では単糖が構成単位になるが、そのような構成単位はない。カルボニル基の供給源である糖は、反応中に脱水、開裂、重合、縮合などのさまざまな反応を起こす。アミノ基の供給源であるアミノ酸はカルボキシル基を除けば骨格を保っている場合が多いが、その存在状態は、遊離アミノ酸、ペプチド、タンパク質と多様である。これらの基質がランダムに反応するので、均一な高分子にはならず不均一でさまざまな部分構造を有する不定形の高分子の混合物がメラノイジンということになる。仮にグルコースとグリシンを基質としたモデル反応で褐変させても、多様な反応生成物が形成される。しかし、色素という点からは400～450 nmの可視領域のE^{1%}（1%溶液の示す吸光度）は、ほぼ数十のオーダーになる。分子式もアミノ酸ごとに一定の範囲を示す。このような観点からはメラノイジンは一定の化学的性質を有していると言える⁽²⁾。

表1 ■ 分子量からみたメイラード色素

メイラード色素	低分子色素	高分子色素（メラノイジン）
分子量	<1,000-2,000	>1,000-2,000
色素	単一分子	混合物（類似物群）
色調	黄, 橙, 赤, 青	茶色
色の強度	個々の色素は微量のため弱い。 積算的。	主要色素
化学構造	同定可能	同定困難
重合・架橋	重合やタンパク質を架橋し高分子化、メラノイジン化する可能性	アミノ酸やタンパク質を含んだ高分子
電荷	さまざま	負に荷電（含窒素の酸性物質）

[農化 第47卷, 第11号, p.727~732, 1973]

醤油の褐変物質 (メラノイジン) について

橋 場 弘 長

(野田産業科学研究所)

昭和48年6月15日受理

Studies on a Melanoidin from Soy Sauce

By Hironaga HASHIBA

Noda Institute for Scientific Research

解説

食品化学・医学への応用に向けたメイラード反応の化学的研究 新奇メイラード反応生成物の探索と同定および分析法開発

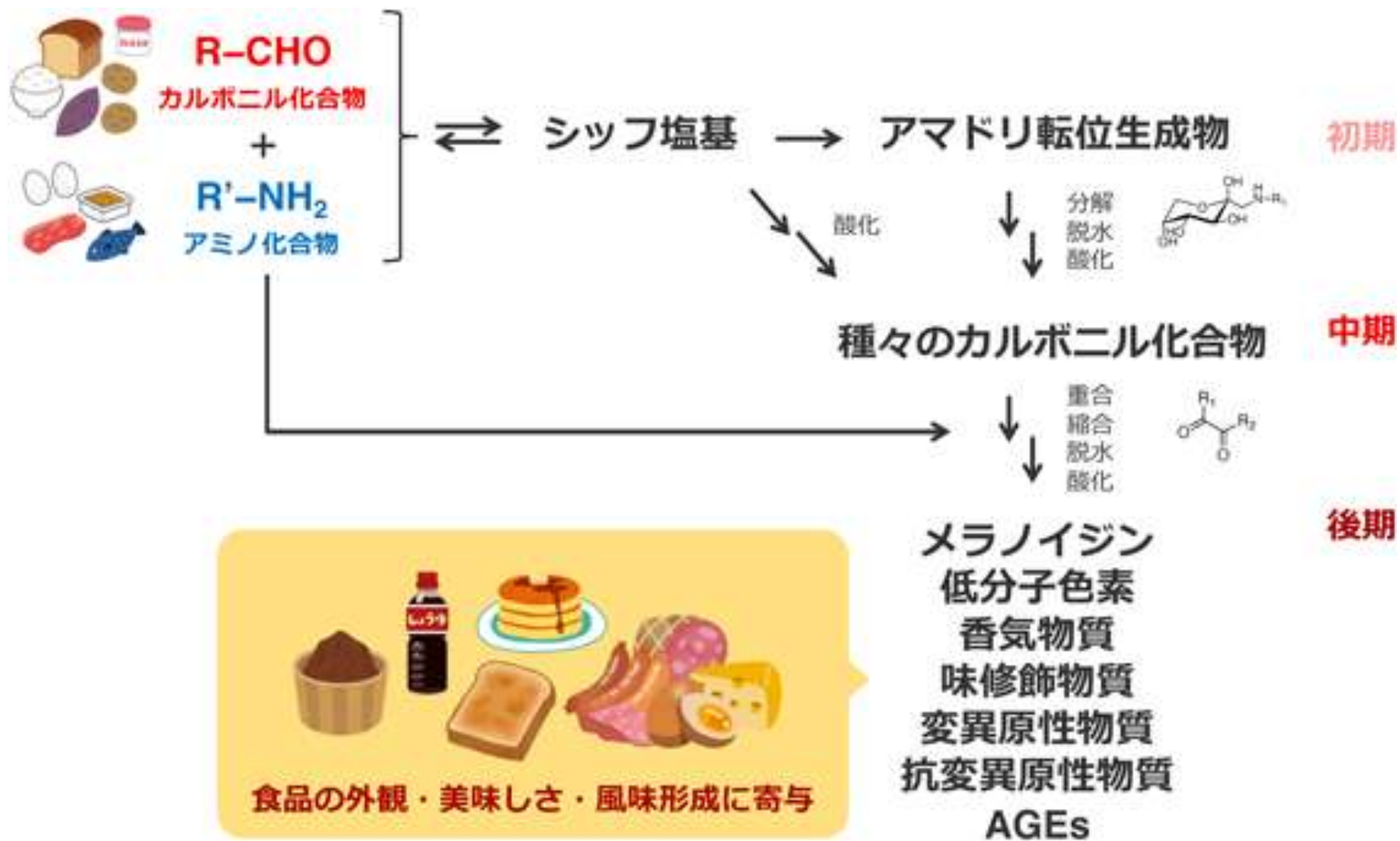
能見 祐理

新潟薬科大学応用生命科学部応用生命科学科

Published: 2023-05-01

メイラード反応は食品の加熱や貯蔵中に頻繁に起こり食品の品質に多大な影響を及ぼすと同時に、生体内においても徐々に進行し老化や各種病態の進展に関与する。反応条件により生成物は多種多様に変容するため、生成物の構造や反応機構が不明なものが多い。そのため、食品の品質や生体の病態に関わる生成物の探索と解析・評価法の確立が望まれている。しかし近年、分析装置の高度化と解析技術の進展に伴い、これまで測定が困難とされてきた物質についてもアプローチできるようになってきた。そのような背景の下、メイラード反応の機構解明と制御法の確立に向けて筆者が取り組んできた研究成果について紹介する。

Key words: メイラード反応; グリケーション; 褐変; 終末糖化産物 (Advanced Glycation End-products) ; α -ジカルボニル化合物



メイラード反応は反応の条件（pH，温度，酸素の有無など）によって多種多様な生成物が形成するため，研究が始まってからほぼ1世紀近く経った現在でもいまだに反応機構の全容が明らかにされていないのが現状である．反応の初期段階におけるアミノ基からカルボニル基への求核付加反応は理解しやすいが，中期段階以降に多種多様な分解・開裂・重合・酸化反応が五月雨式に起こり，反応に関わる物質も増えるため，その反応機構は非常に複雑なものとなる．そのため，各段階の反応の指標となりうる生成物の探索や同定が行われ，反応の進行を評価するのに活用されてきた．初期段階ではアマドリ化合物，中期段階では各種カルボニル化合物，後期段階ではメラノイジン由来の褐変度（420～450 nmの吸光度や色差計での L^* ， a^* ， b^* 値， ΔE^* 値など）や香気成分，終末糖化産物AGEsなどが反応の経過を示すマーカーとして利用することができるが，反応機構や生成物についてはいまだ不明な点も多く，測定法も確立されていないものが多い．しかし近年の機器分析・解析技術の進歩により，これまで測定が困難とされてきた物質についてもアプローチできるようになってきた．そのような経緯もあって，筆者はメイラード反応の機構解明とその制御に向けて，先行研究で見逃されてきた未知化合物の探索とその構造解析，反応指標物質の一斉分析法の開発とその応用研究に取り組んできた．本稿ではその成果について紹介する．

次世代の表示デバイス エレクトロクロミック素子

色が変化するエレクトロクロミックキーホルダーを作ってみよう

スライドスイッチ: □
押しボタンを押す



紫一色の状態



スライドスイッチ: ○
押しボタンを押す



雪の結晶
が現れる



物質が外部の刺激（光、熱、圧力、電圧など）



可逆的に色が変化する現象

日光を浴びると色が濃くなる眼鏡
(フォトクロミズム)



温度で
色が変化する
マグカップ
(サーモクロミズム)





光が強い時

光が弱い時

眩しい光をフォトクロミック分子を使って減光するコンタクトレンズ

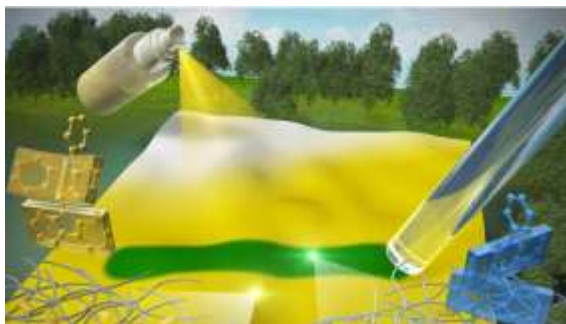
紫外線の強さで着色が変化する



「紫外線で色が変わるコンタクトレンズ」は視覚のノイズキャンセリングかもしれない

<https://www.gizmodo.jp/2019/12/jnj-acuvue-oasys-with-transitions-noise-cancelling.html>

機械的な力（圧迫、ひっかくなど）によって色が変化する現象 （メカノクロミズム）



押すと色が変わり、元の色に戻せる紙：

メカノクロミック材料を含むセルロースナノファイバー紙

<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2024/01/post-621.html>

pH変化によって色が変化する現象 （アシドクロミズム）



紫キャベツのアントシアニン色素が
pHにより反応し色が変わる

<https://www.iph.osaka.jp/s017/070/070/07/20240716160631.html>

エレクトロクロミズムは、電気化学的な酸化・還元反応によって、電子移動体の一方もしくは両方が着色する現象

有機分子に電流を流したり、電圧を印加することで色が変わる!?

電子ペーパーや防眩デバイス、省エネ調光ガラス(スマートウィンドウ)等のデバイスへの応用が期待

エレクトロクロミック材料ならではの特徴

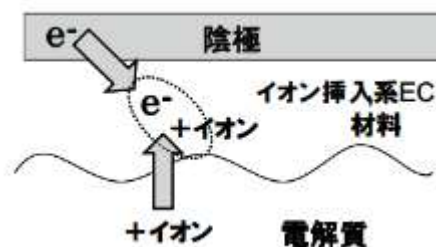
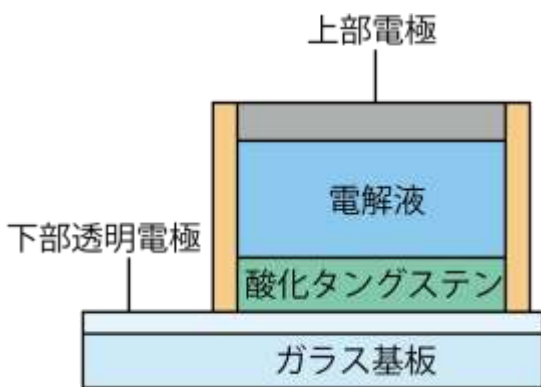
エレクトロクロミック材料は、電源を切ってもその時の状態(色)を保持可能



例えば、電源を切ってもその文字は消えません(メモリー効果)
低消費電力な表示デバイスが実現できる

無機系では、三酸化タングステン(WO₃)の蒸着膜が還元により無色から青色へまた、酸化すると無色へ可逆的に変化することが知られていた

S.K. Deb, Appl. Opt. Suppl.3, 193 (1969).



1968年、G.H. Heilmair らが、液晶に電圧をかけると、透明であった液晶が乳白色に変わる現象を使った液晶ディスプレイを発表

G.H. Heilmair, L.A. Zanoni and L.A. Barton, Proceedings of the IEEE 56, 1162 (1968)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/61/7/61_7_483/_pdf/-char/ja

エレクトロクロミズム研究も液晶と同じ程度、歴史が長いが液晶にディスプレイとしての立場を奪われて、影を潜めていた
2011年、ボーイング787の窓にはシェードがなく、ボタンを押し、窓の濃淡が透明から濃い青色の5段階に変化させることができる

電子カーテンとして表舞台に!





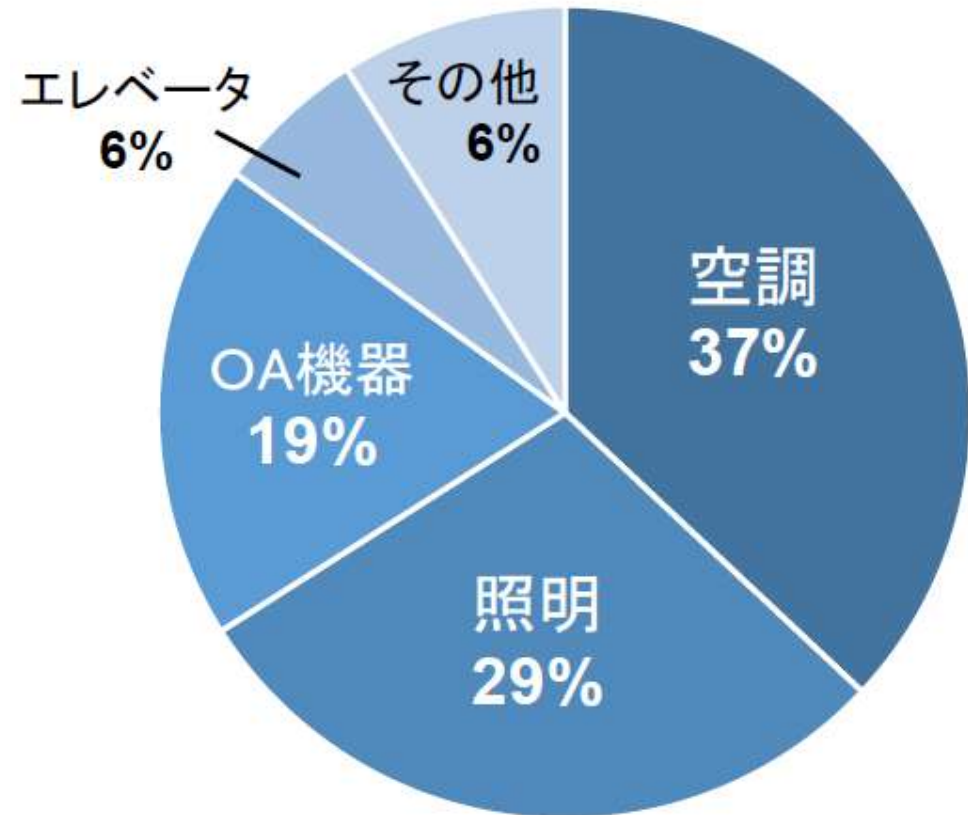
台湾を学生と旅した際の飛行機





ONE FUKUOKA BLDG.

オフィスビルにおける 用途別電力消費比率



資源エネルギー庁推計

現状

オフィスの高層化やオープンスペース化が進み、外壁に開放的な大型の窓が使用されるようになってきた

課題

多くの窓は日差しを防ぐためにロールカーテンやブラインドが設置され、景色を楽しめない

解決

窓ガラス自体に調光性があれば効率的な遮光が実現でき、更に空調の省電力化、CO₂削減への貢献も期待できる



エレクトロクロミック(EC)調光ガラス



現状

ボーイング787の窓などに
エレクトロクロミック(EC)調光ガラス(電子カーテン)が採用

課題

従来のECは液体電解質を使うため封止が必要 → 大型化は困難
大型化するのに高額な真空製膜設備が必要 → 製造コストが上昇

解決

塗布により成膜可能なEC材料



安価にEC調光ガラスを大面積化できる



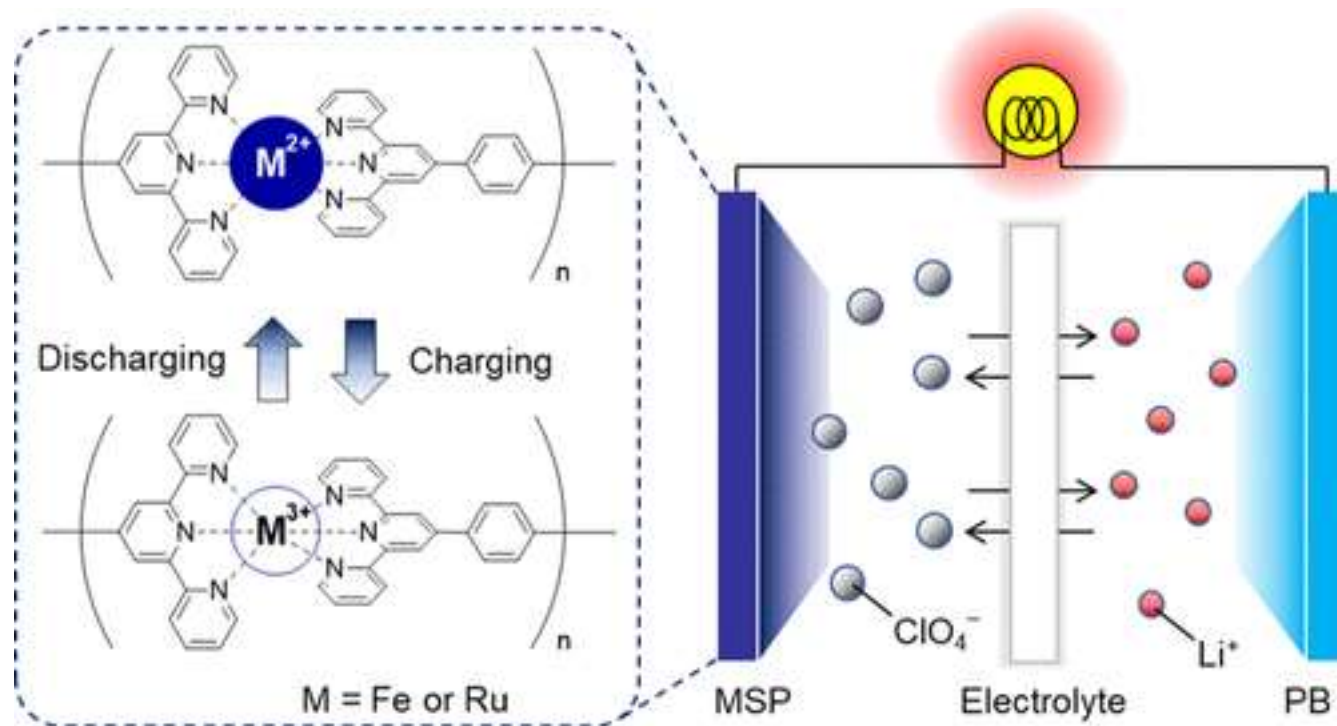
画像生成系AI
Canvaで作成

窓が蓄電池としてはたらく!?

昼間に日差しを防ぎながら電気を蓄え、夜間に蓄えた電気で明かりを灯すこともできる

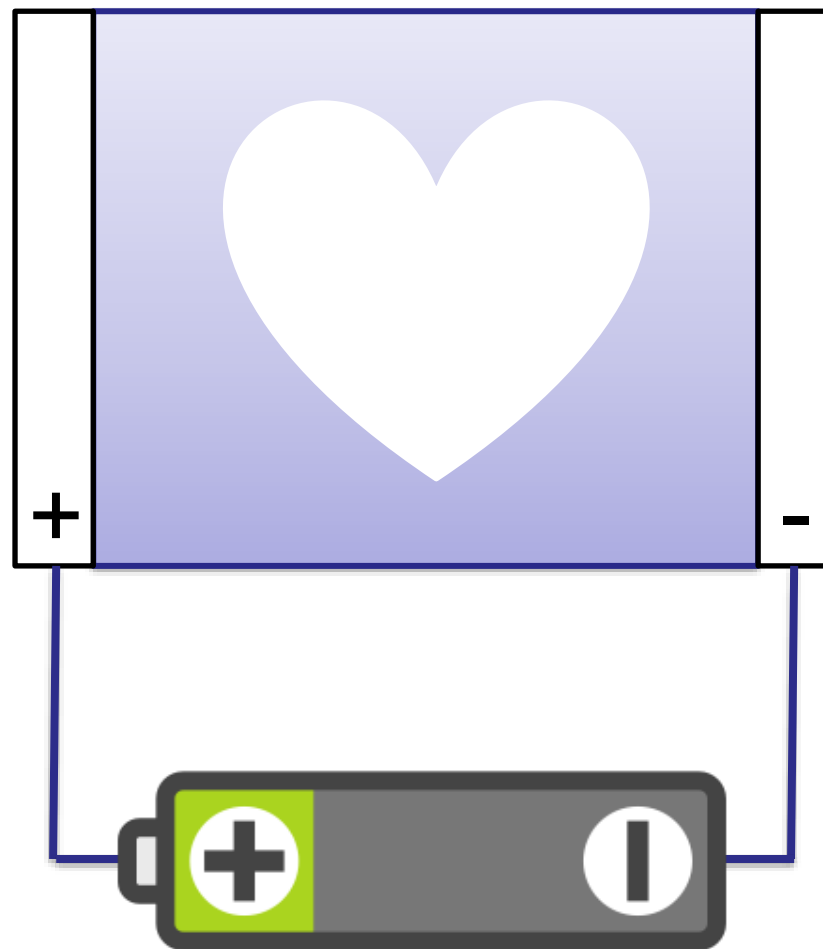
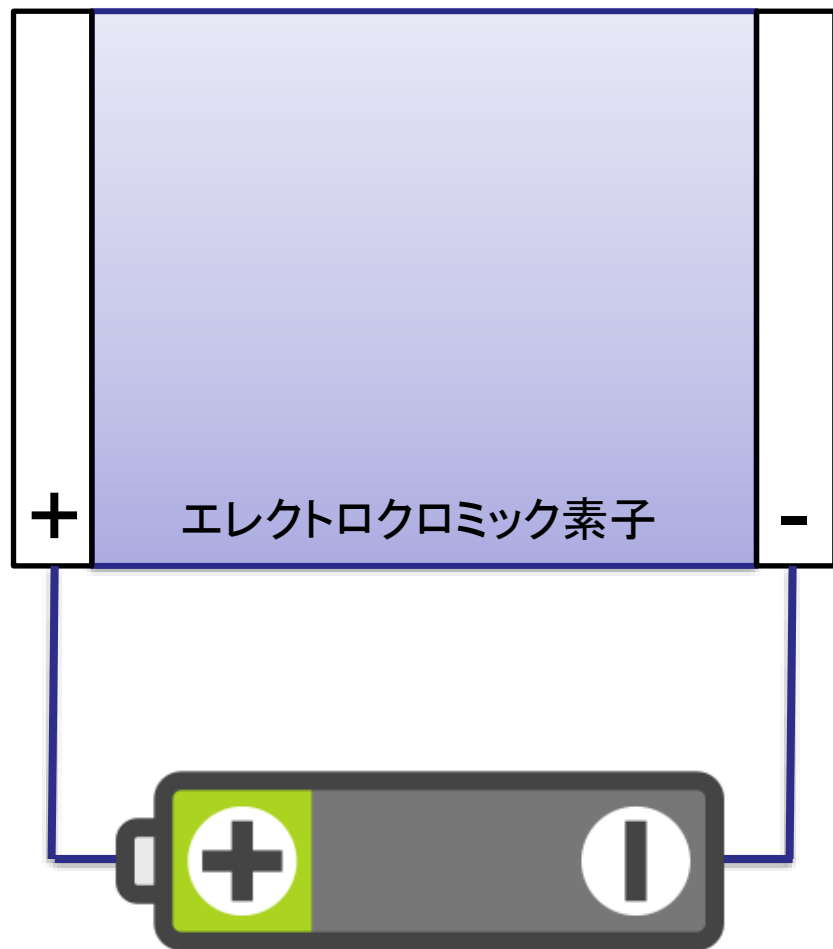


画像生成系AI Canvaで作成

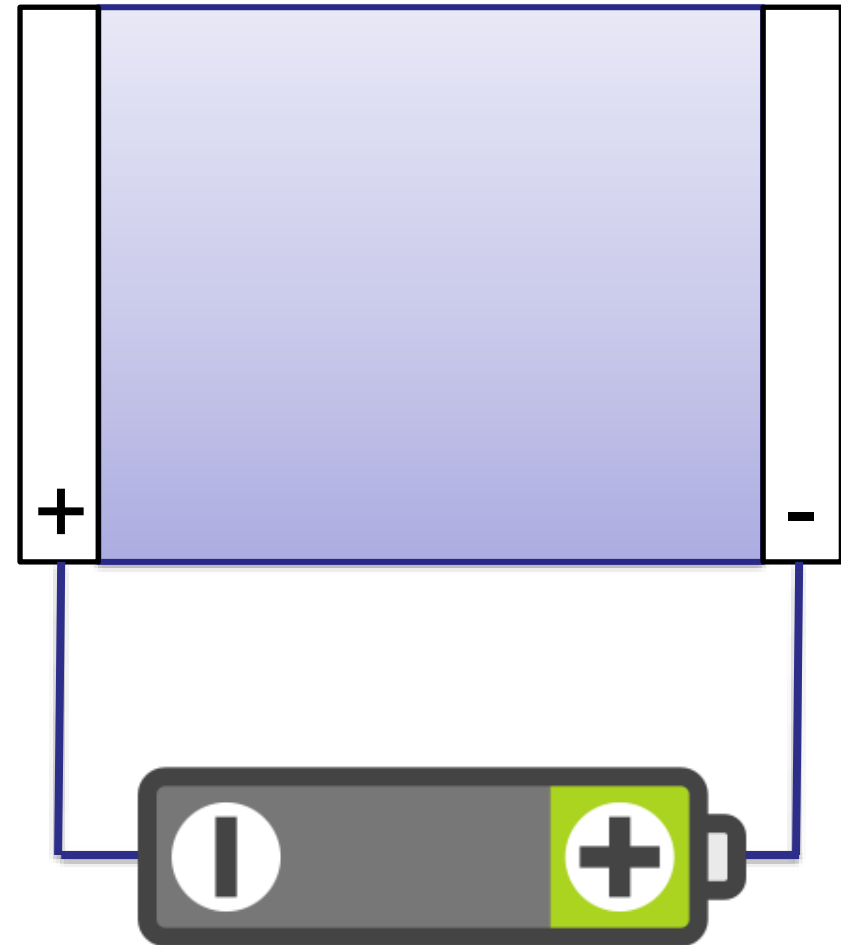
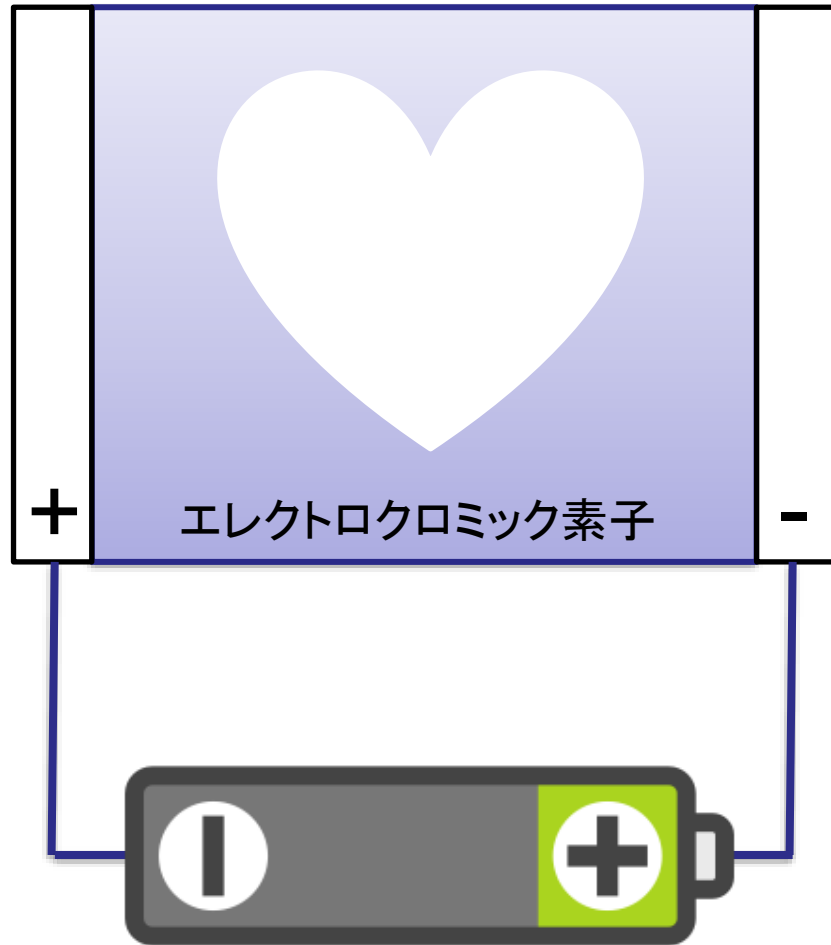


M. Higuchi, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, 12, 16342.

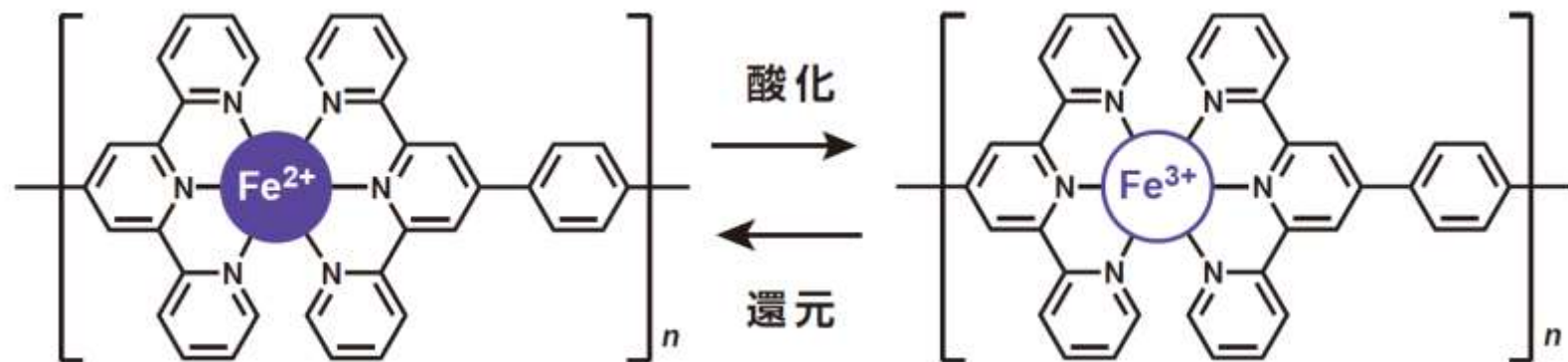
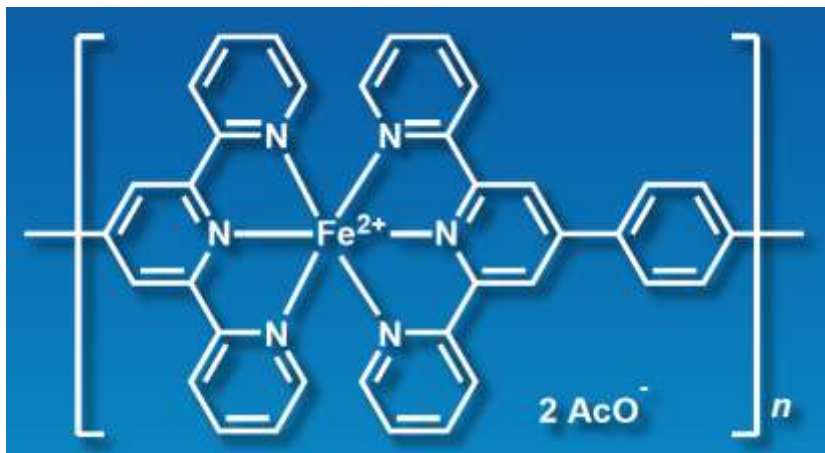
電池とエレクトロクロミック素子のプラス・マイナス側を合わせてつなぐと色が消える



電池とエレクトロクロミック素子のプラス・マイナス側を逆につなぐと色が消える



メタロ超分子ポリマー ポリパープル



着色状態

Fe²⁺

ポリパープルは、鉄イオン(Fe²⁺)から有機配位子への電荷移動 (MLCT)吸収を580 nm付近に有するため紫色に見える

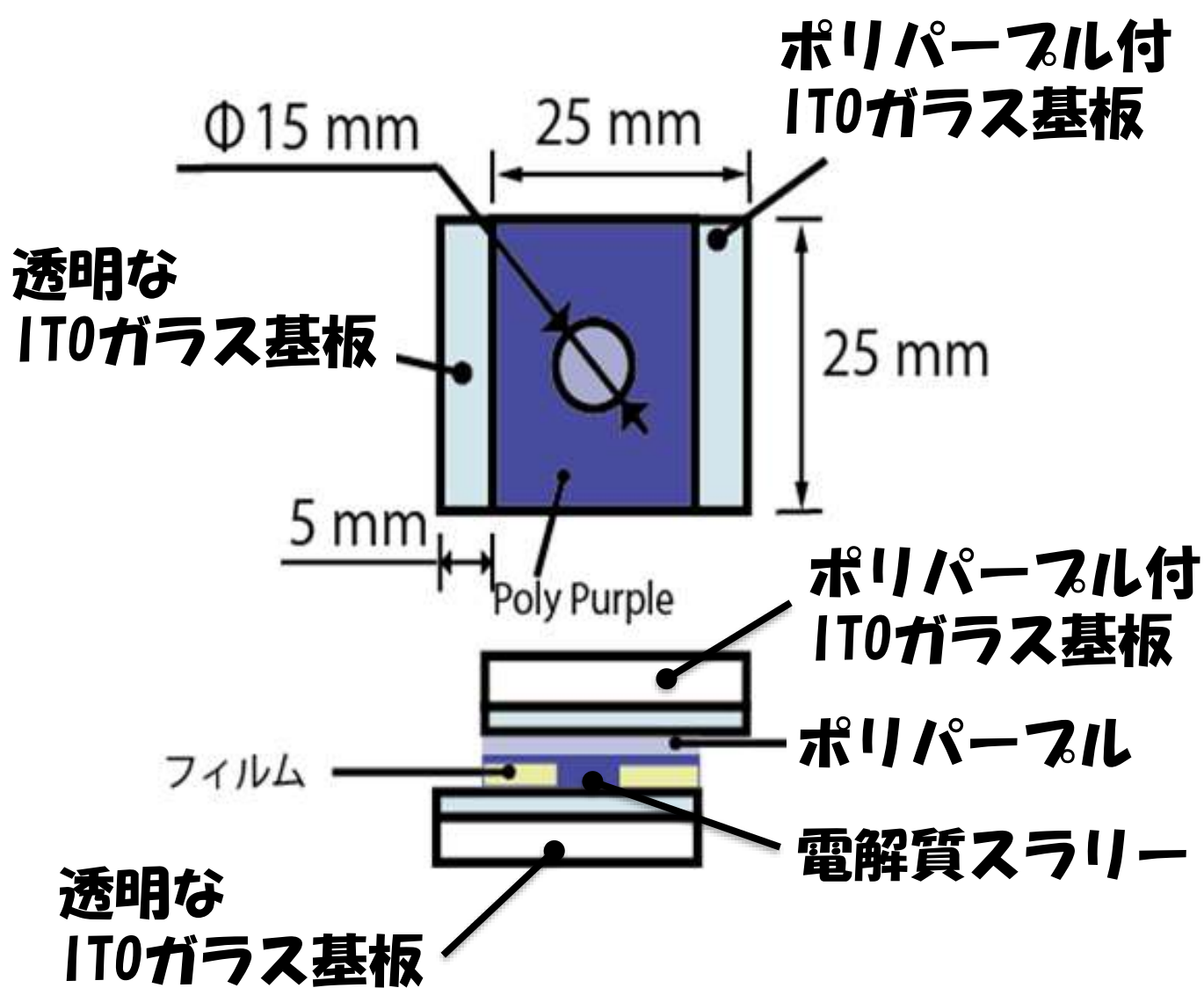
透明状態

Fe³⁺

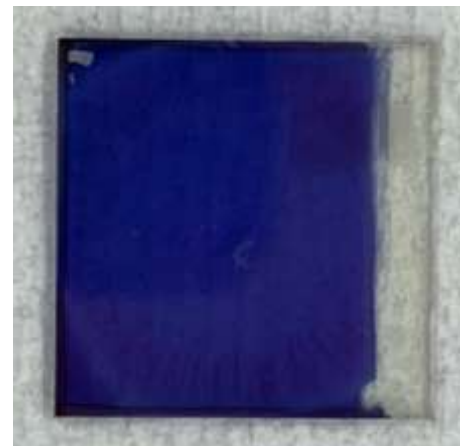
ポリパープルの鉄イオンを電気化学的に2価から3価に酸化すると、MLCT吸収が消失し色が消える



エレクトロクロミックキーホルダー作製



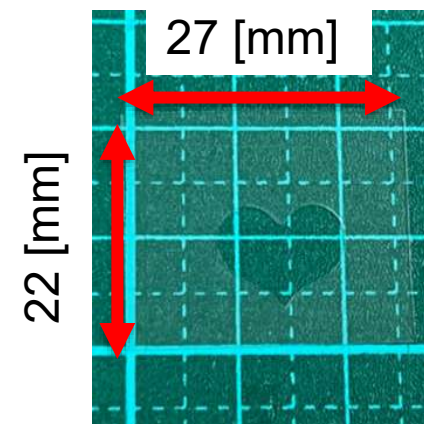
ポリパープル付ITOガラス基板



透明なITOガラス基板



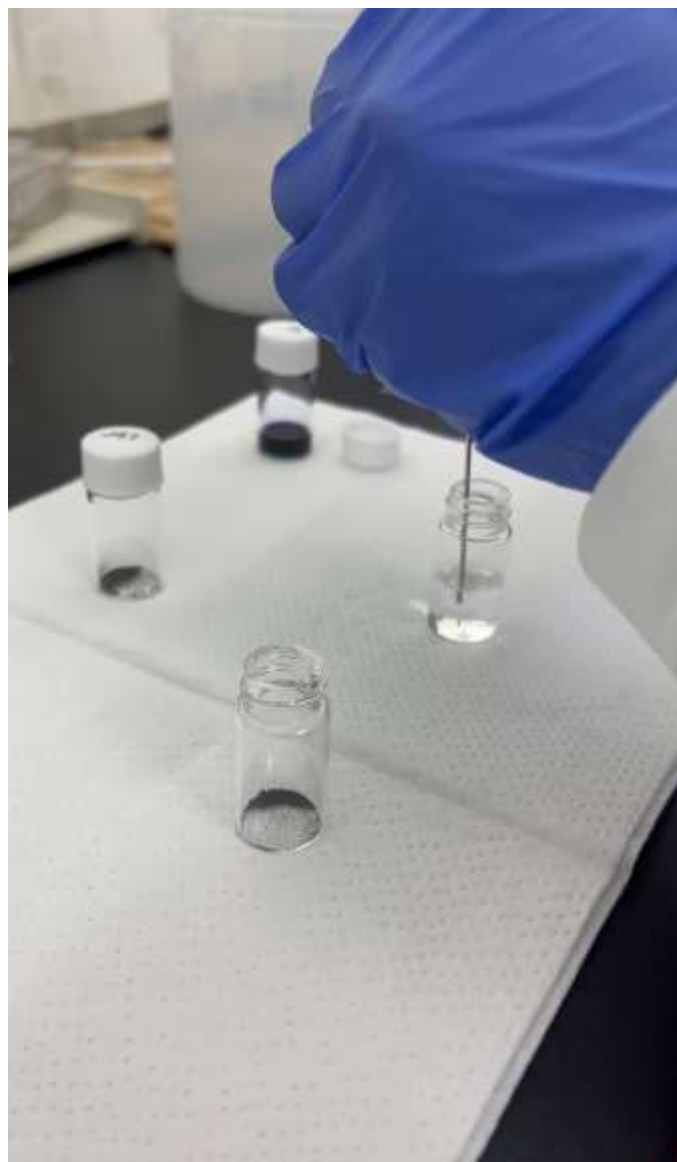
穴あきフィルム



ITOガラス基板の片側は電気を流さないガラス、もう片側は電気を流す透明電極
テスターを使って確かめよう

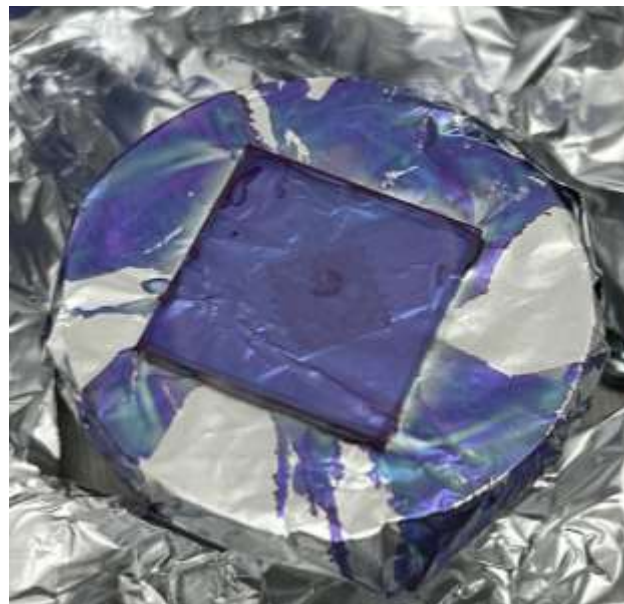


- ① ポリパーフル[15 mg]にメタノール[1 mL]を入れる
- ② マグネティックスターラーで2時間ほど攪拌





- ① ITO電極側を上にしてスピンのコータの台に固定
- ② ITOの中央にポリパープル溶液を100 [μ L]滴下
- ③ 基板を回転させる(2000 [rpm], 25 [s])
- ④ 溶液が遠心力で広がり薄膜ができる



① 材料の調合

過塩素酸リチウム[0.45 g]
炭酸プロピレン[3 mL]
ポリメタクリル酸メチル[3 g]

② 攪拌

室温で2時間程度攪拌

③ 脱泡

減圧させて電解質スラリーの
気泡無くす



計量



攪拌



脱泡

- ① フィルムはOHPフィルム(厚み100 [μm])を使用
- ② フィルムを好きなカタチのパンチを使って穴を開ける
カッターを使って好きなカタチに穴を開けても良い

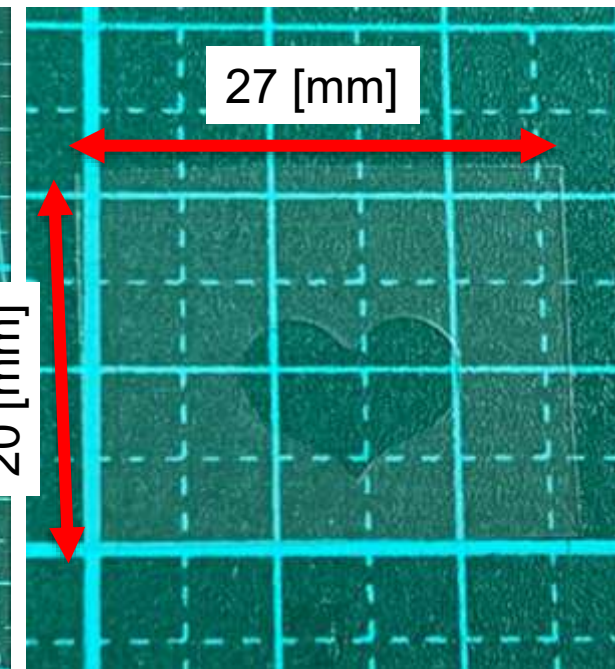
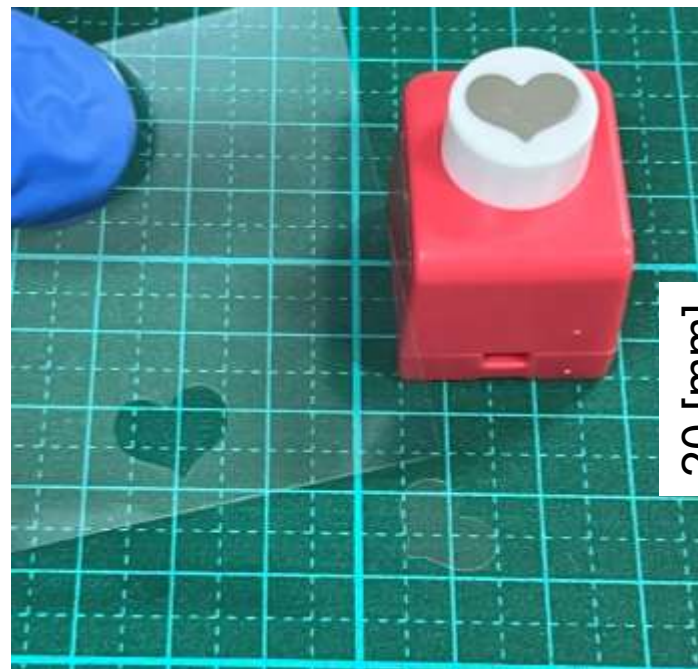


5 [cm]角のフィルムを準備
パンチに差し込む

フィルムは奥まで差し込む

パンチを台の上に置き、上から押す

フィルムをカットする



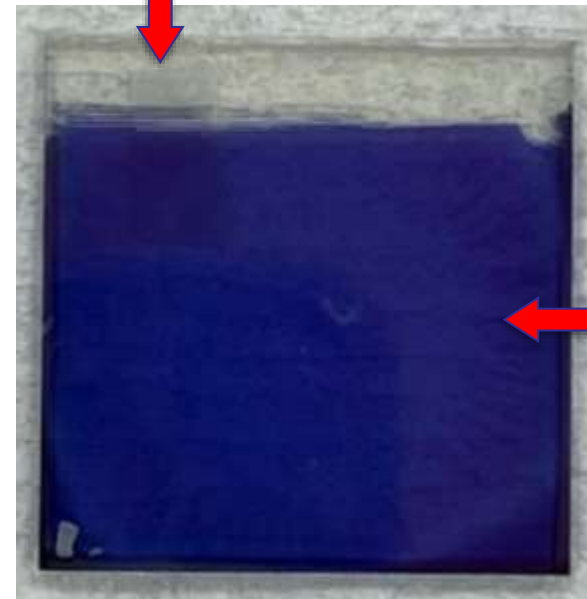


複数枚入っています。
グループ内でわけてください。



どちらか一枚入っています。

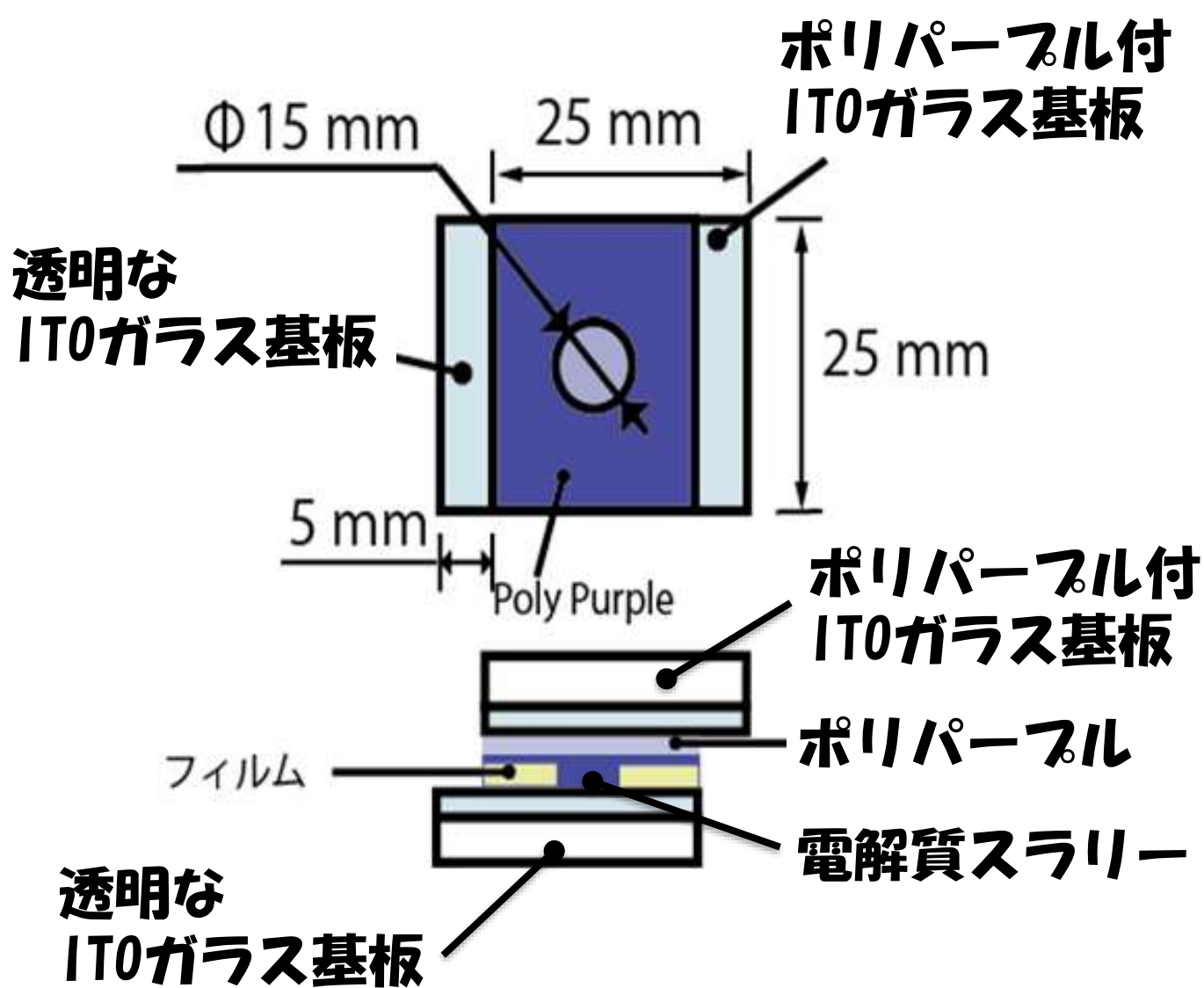
白テープ



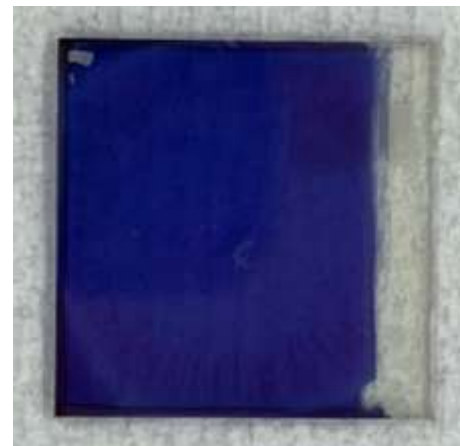
ポリパール付
ITOガラス基板

ポリパール

表面には、ポリパールが塗布されている。
表面は触らないように。
裏面のガラス側には白テープがついている。



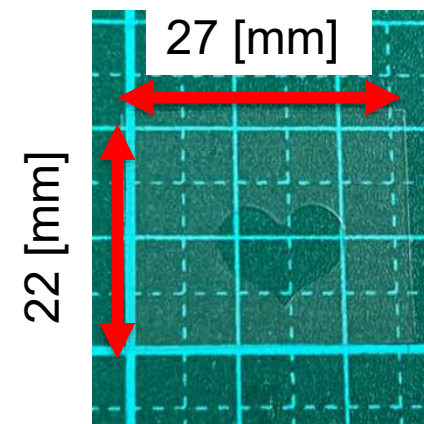
ポリパープル付
ITOガラス基板



透明な
ITOガラス基板



穴あきフィルム



作業はペーパータオルの上で行いましょう

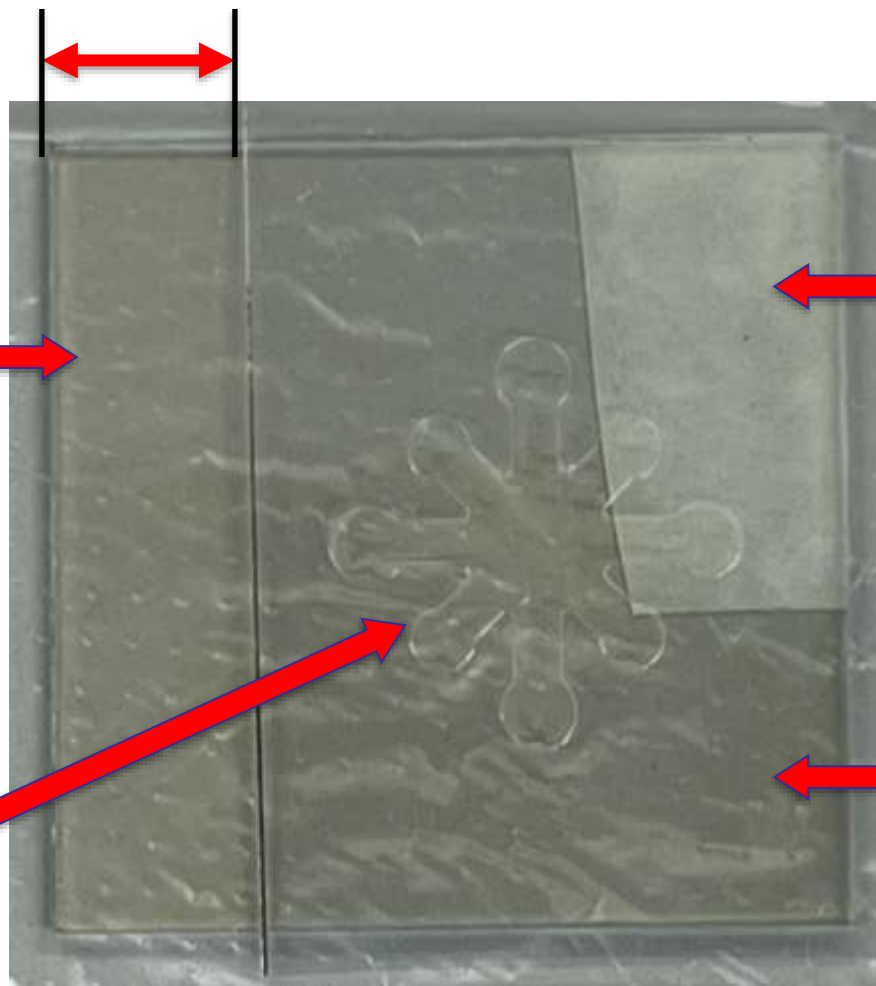
5mmほど隙間を開ける

透明なITOガラス基板

透明なITOガラス基板の白テープが下になる

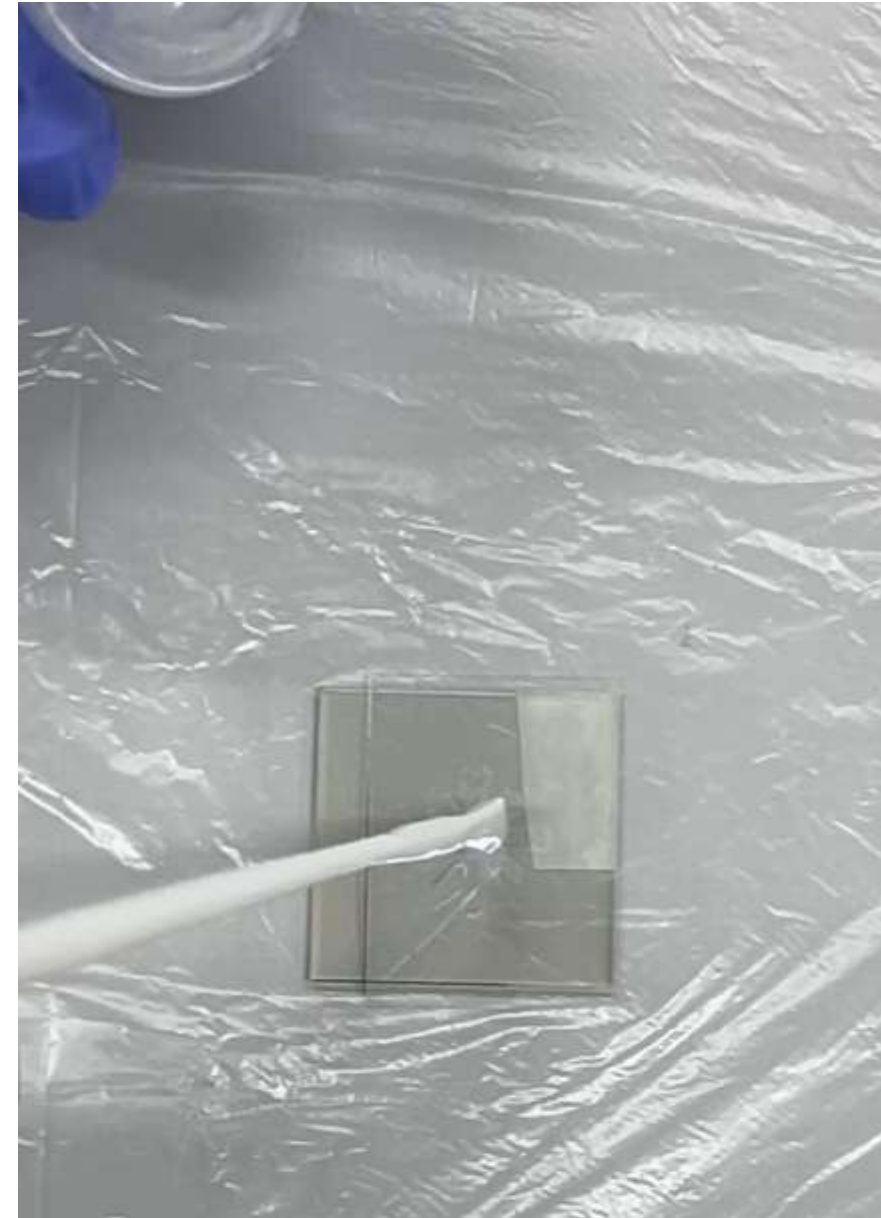
フィルムの穴がITOガラス基板の内側になるように

穴あきフィルム



電解質スラリー

薬さじやヘラを使ってフィルム
の穴を覆い隠す
ように塗る



5mmほど
隙間を開ける

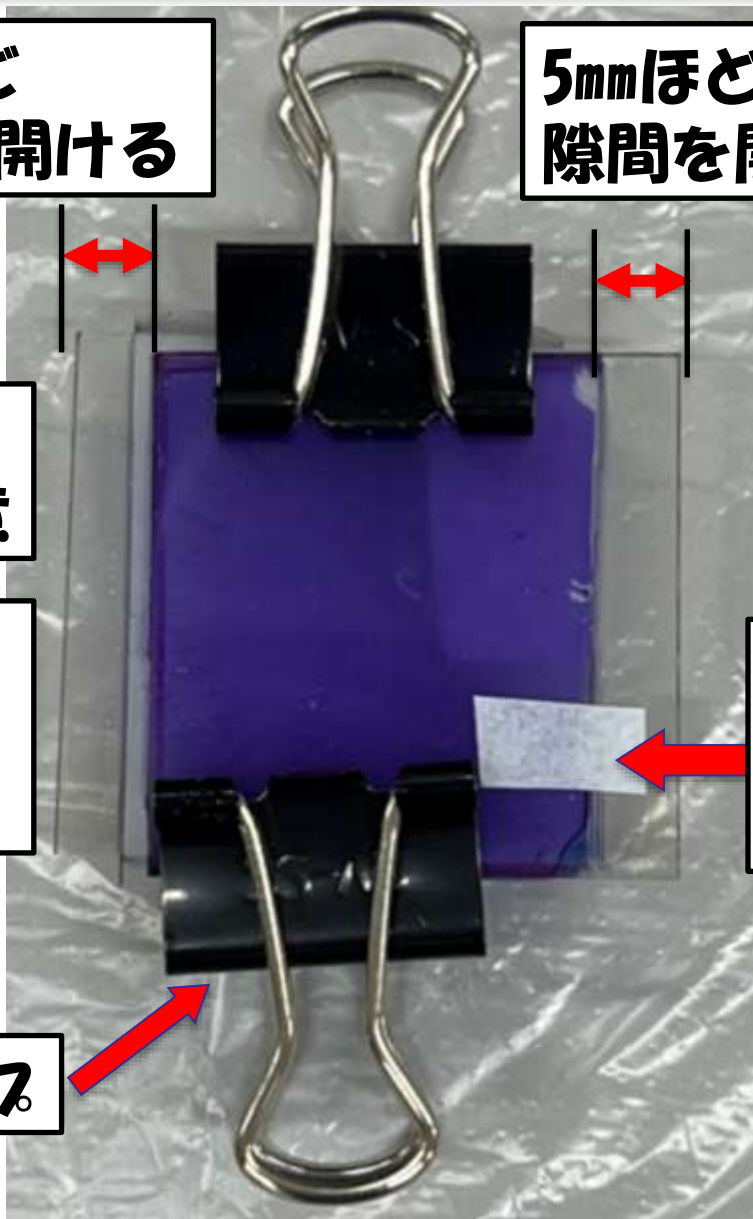
5mmほど
隙間を開ける

気泡が入ら
ないように注意

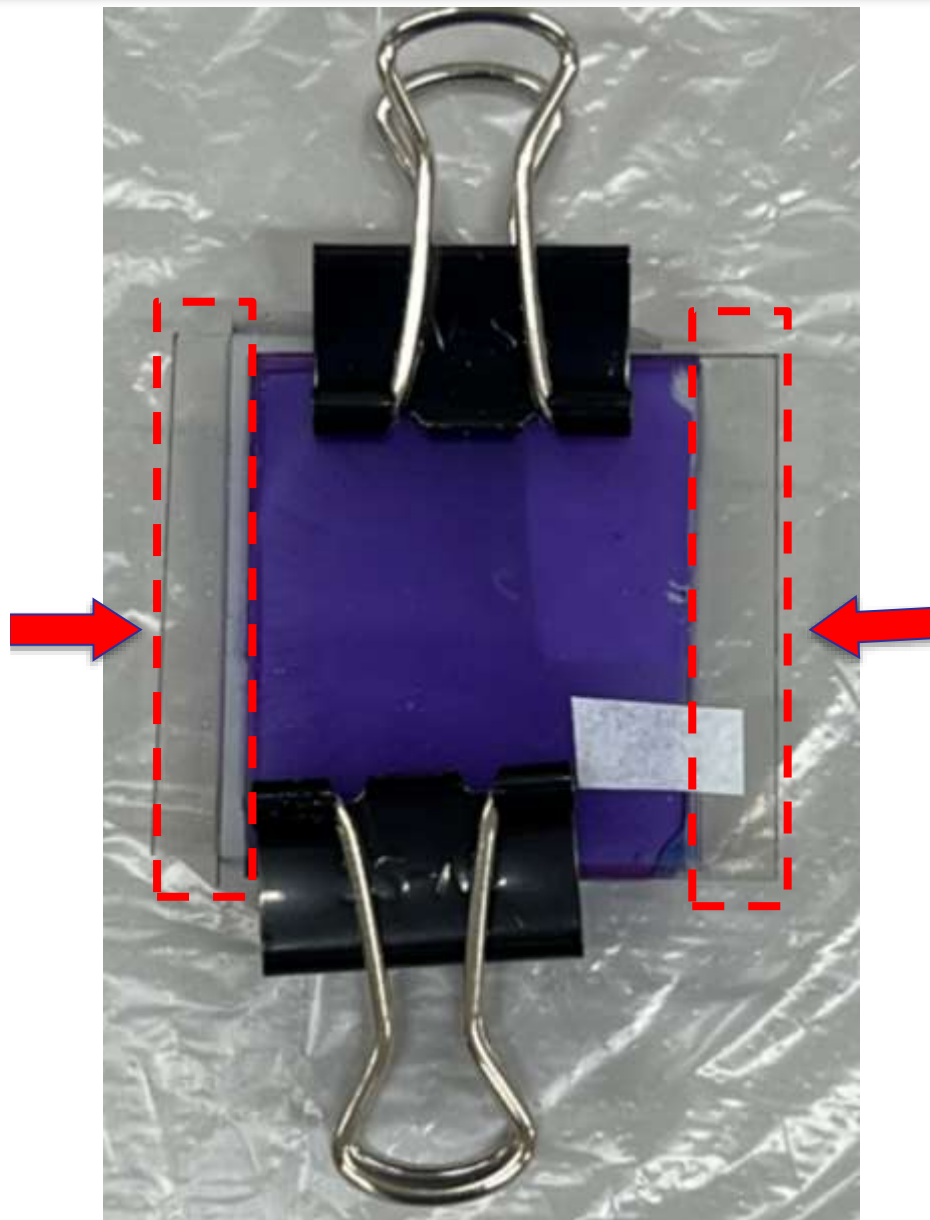
何度も基板を
ずらすと膜が
削れる

ダブルクリップ

ポリパーフル付
ITOガラス基板
の白テープが上

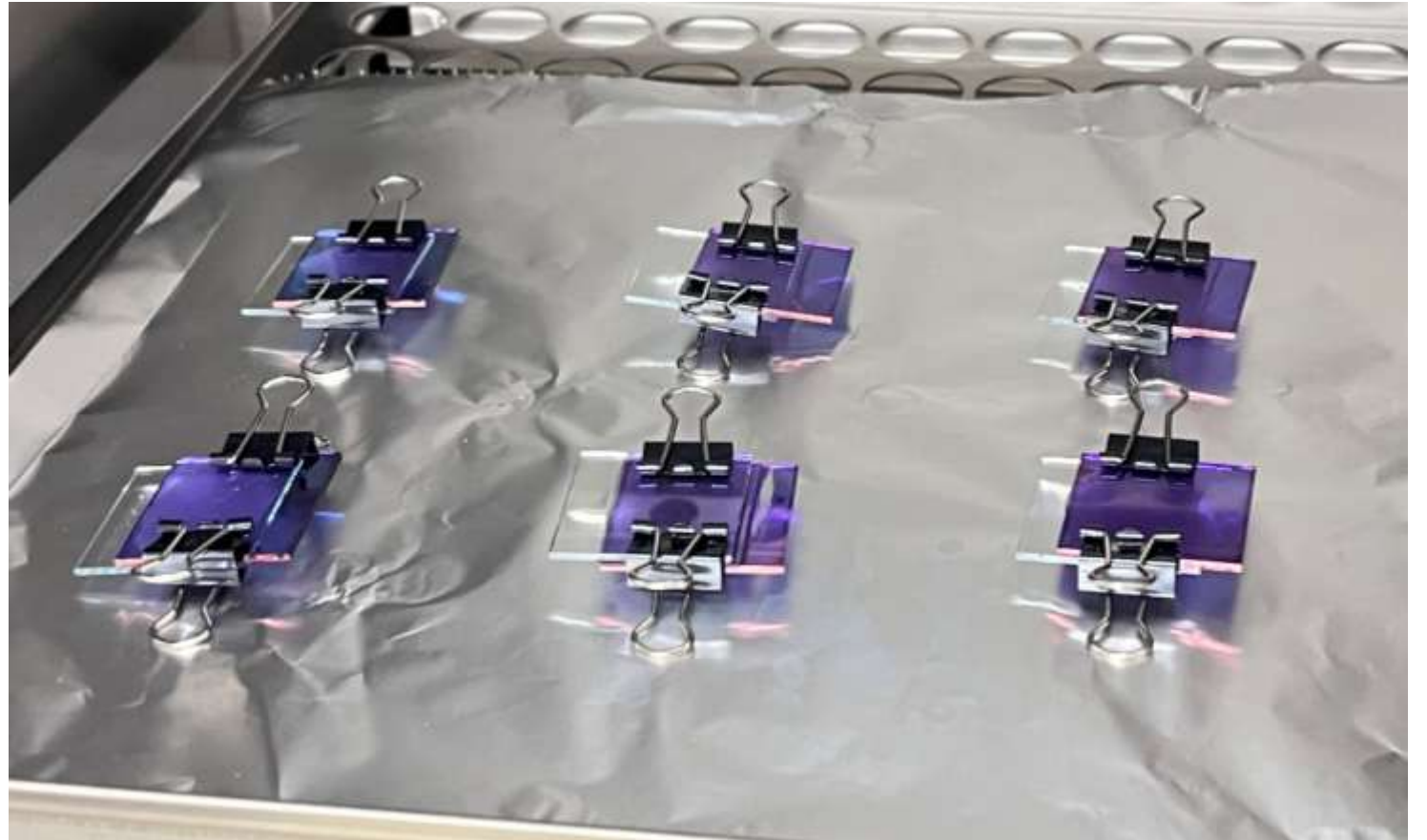


左右のITO電極面にはみ出した電解質スラリーをアセトンをしみこませた綿棒やキムワイプで拭き取る





**100度で20分程度加熱して、
硬化させます**



導電性両面テープの
保護シートを剥がす



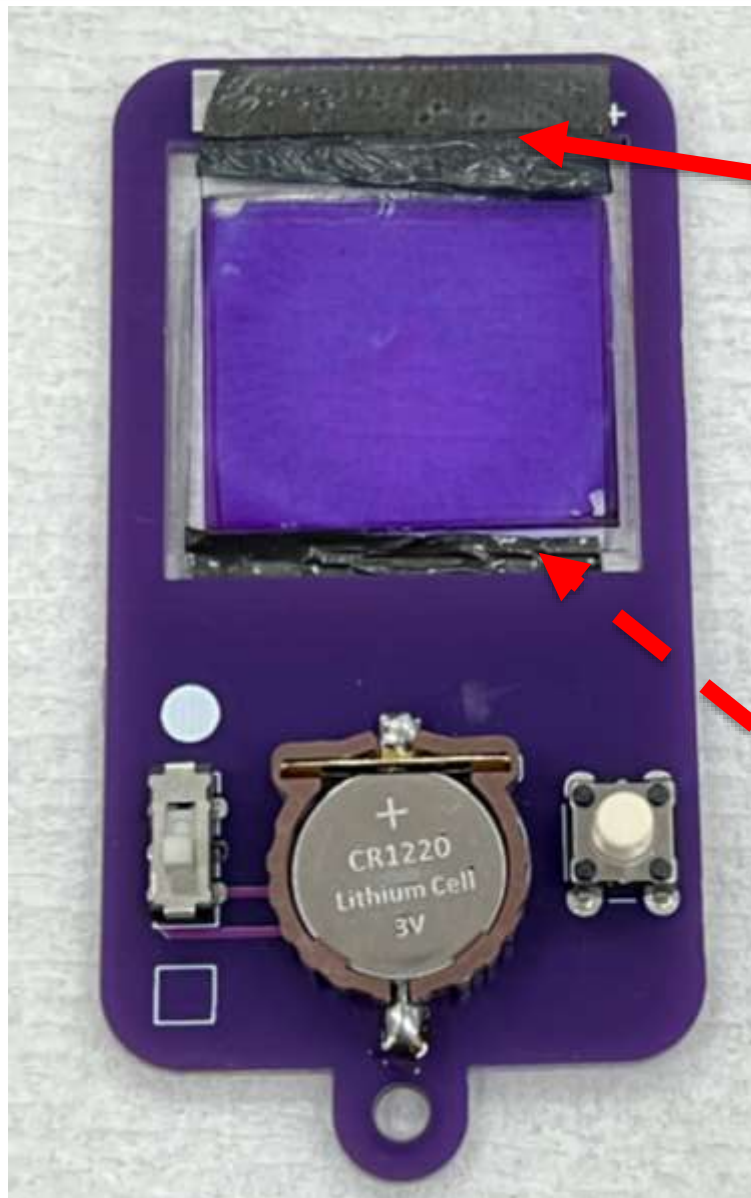
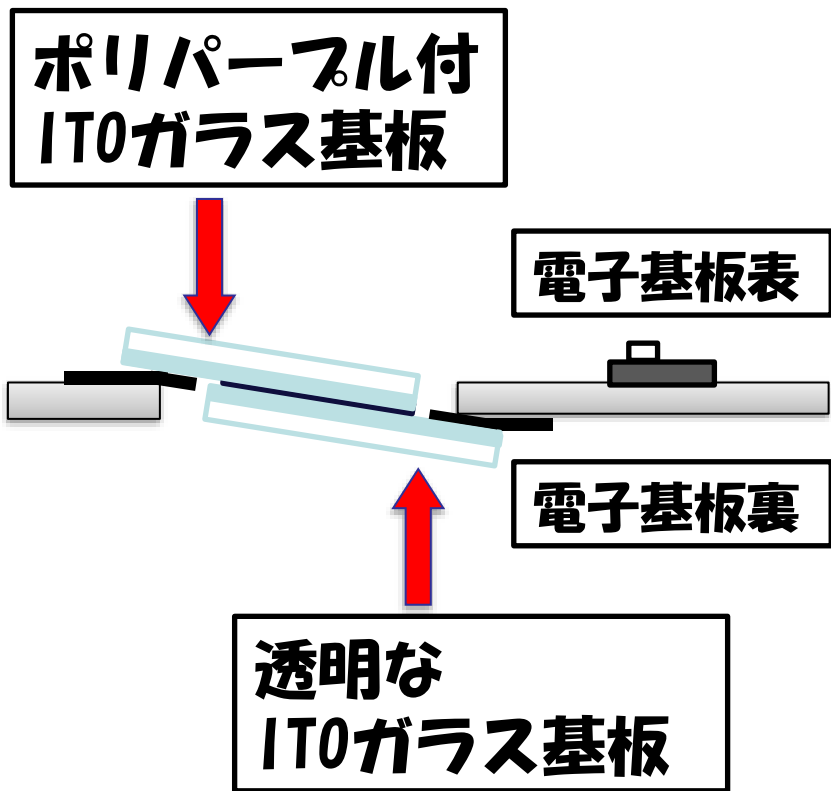
導電性両面テープ

導電性両面テープ

スライド
スイッチ

押しボタン

ボタン電池
ホルダー



ポリパーフル付ITOガラス基板のITO電極面を基板の表面上部の導電性両面テープに貼り付ける

透明なITOガラス基板のITO電極面を基板の裏面下部の導電性両面テープに貼り付ける



ストラップを電子基板の穴に取り付ける

ボタン電池のプラスを上にして電池ボックスに入れる

スライドスイッチ: □
押しボタンを押す



紫一色の状態



スライドスイッチ: ○
押しボタンを押す



雪の結晶
が現れる



押しボタンを押す時間は、変化に合わせて調整してください

「有機トランジスタを作ってみよう」



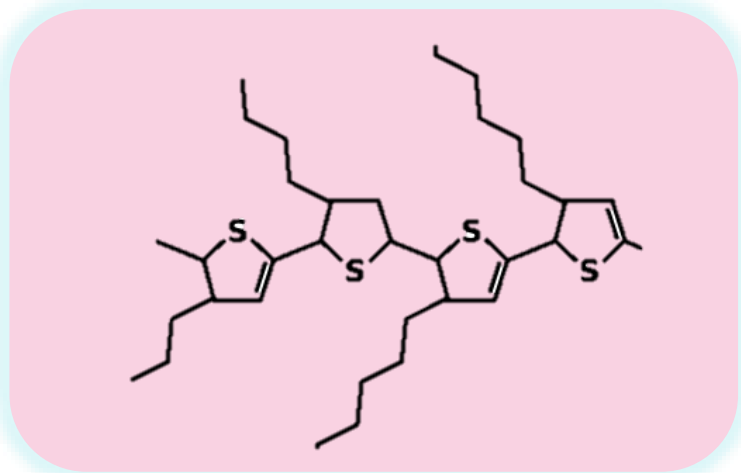
**九州産業大学 理工学部
電気工学科(機械電気創造工学科) 貞方**

作製する有機分子P3HTを用いた有機トランジスタ 125

p型有機半導体ポリマー材料

P3HT

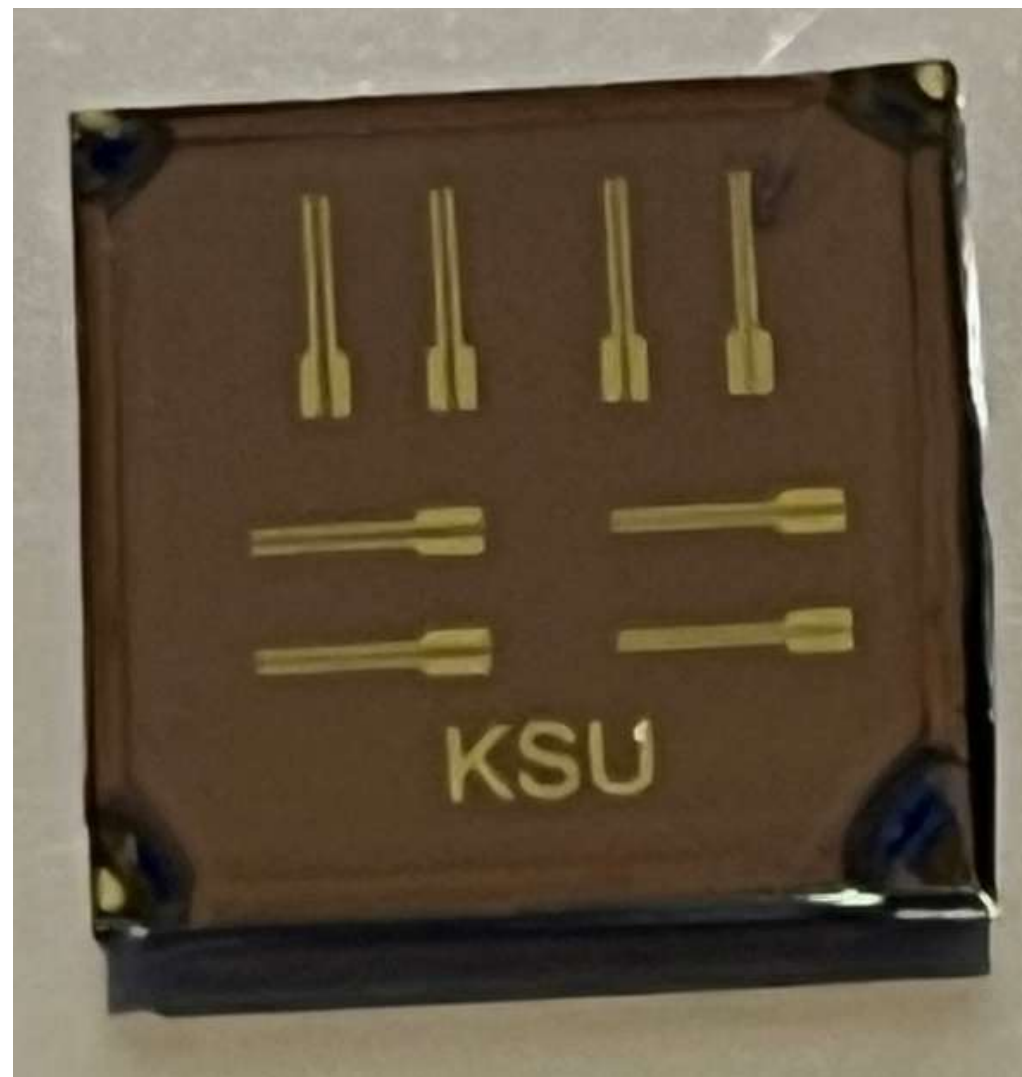
(ポリ(3-ヘキシルチオフェン-2,5-ジイル))



基板サイズ: 10mm角

チャンネル長 L : 100, 80, 60, 40 μm

合計: 8素子

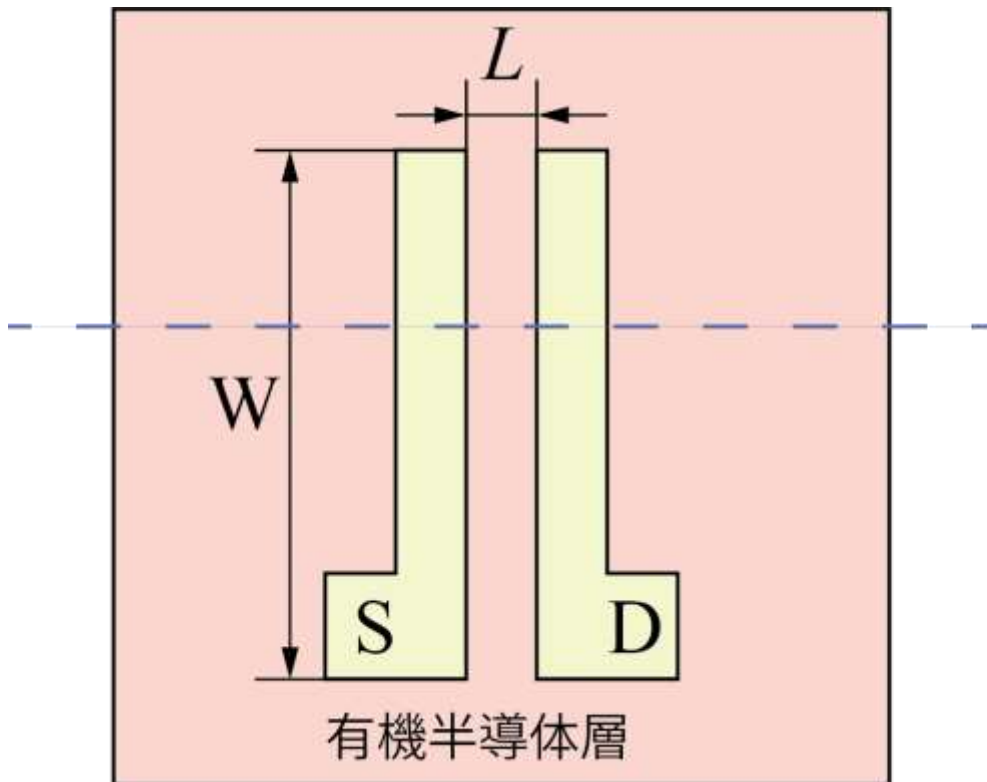


トランジスタの構造は

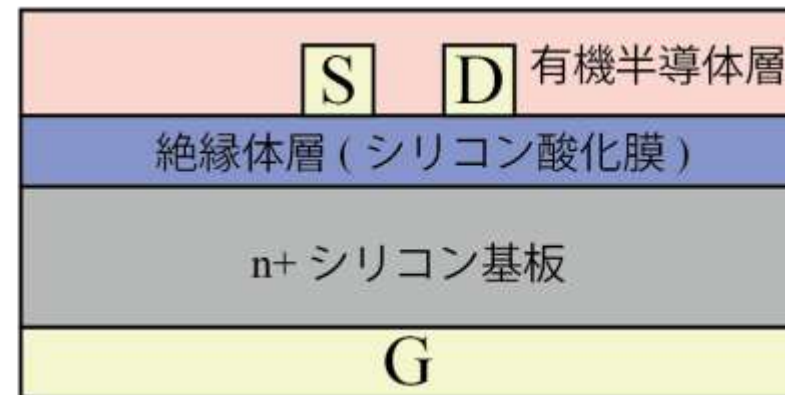
シリコン酸化膜(SiO_2)付(280nm) n^+ Siウエハの裏面にゲート電極(Cr/Au)

SiO_2 の上にソース(S)とドレイン(D)電極(Au)

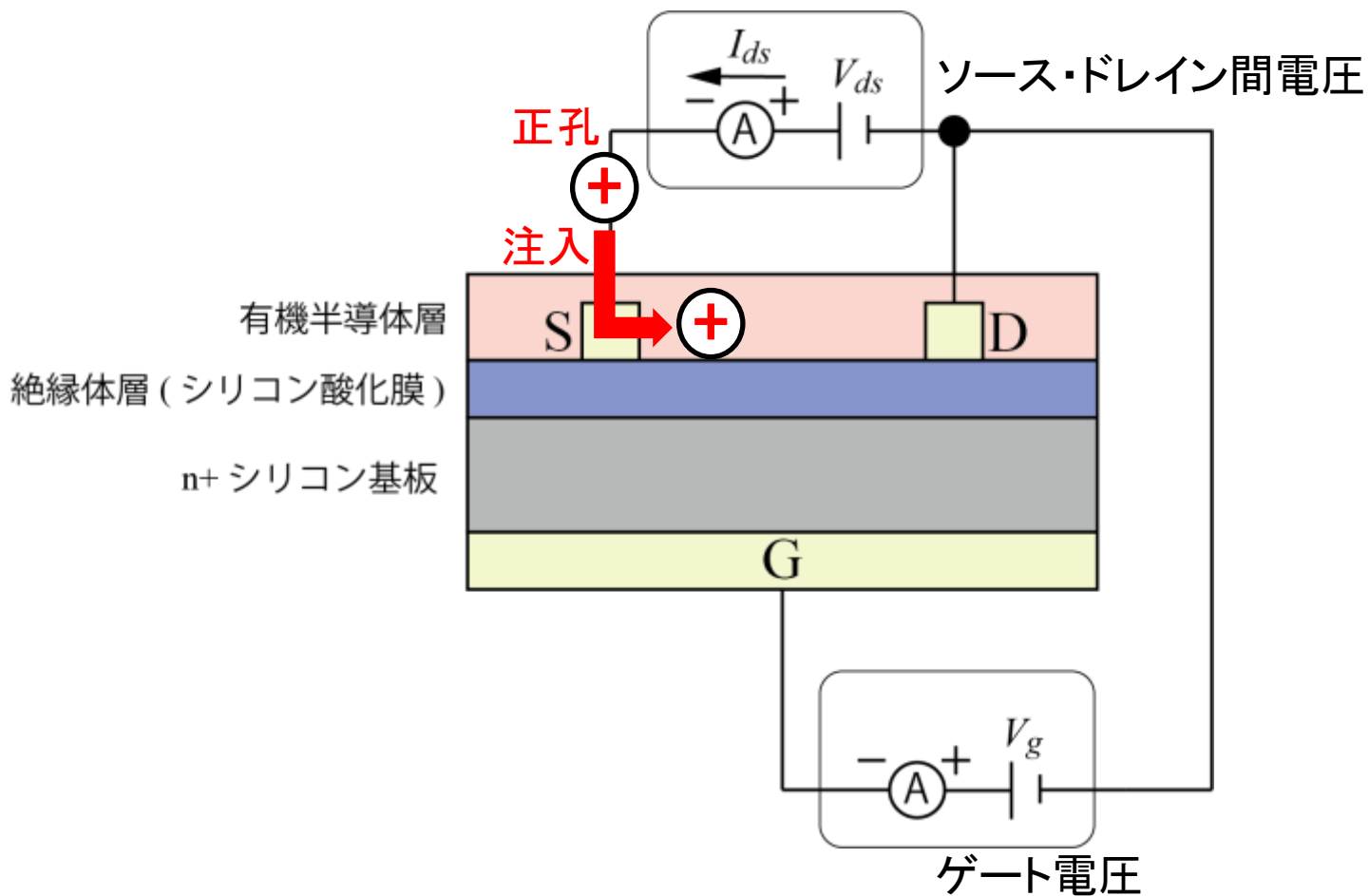
SiO_2 とS・D電極の上に有機半導体層



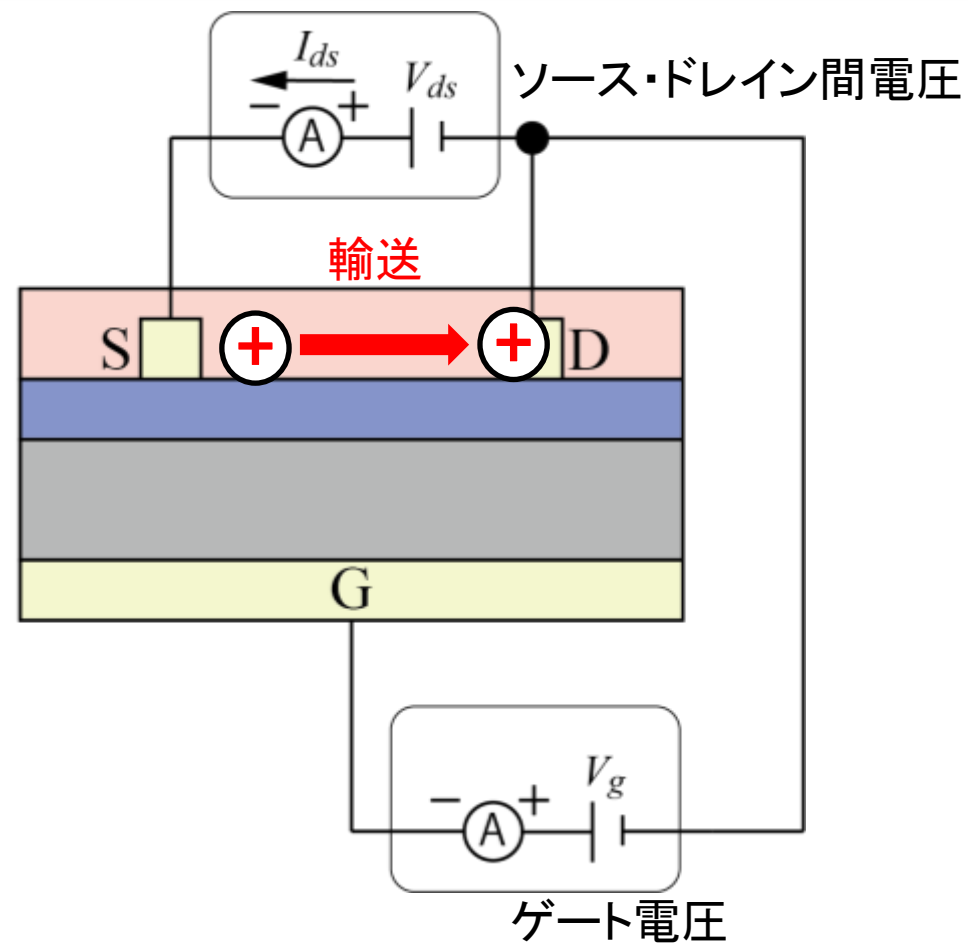
上面図



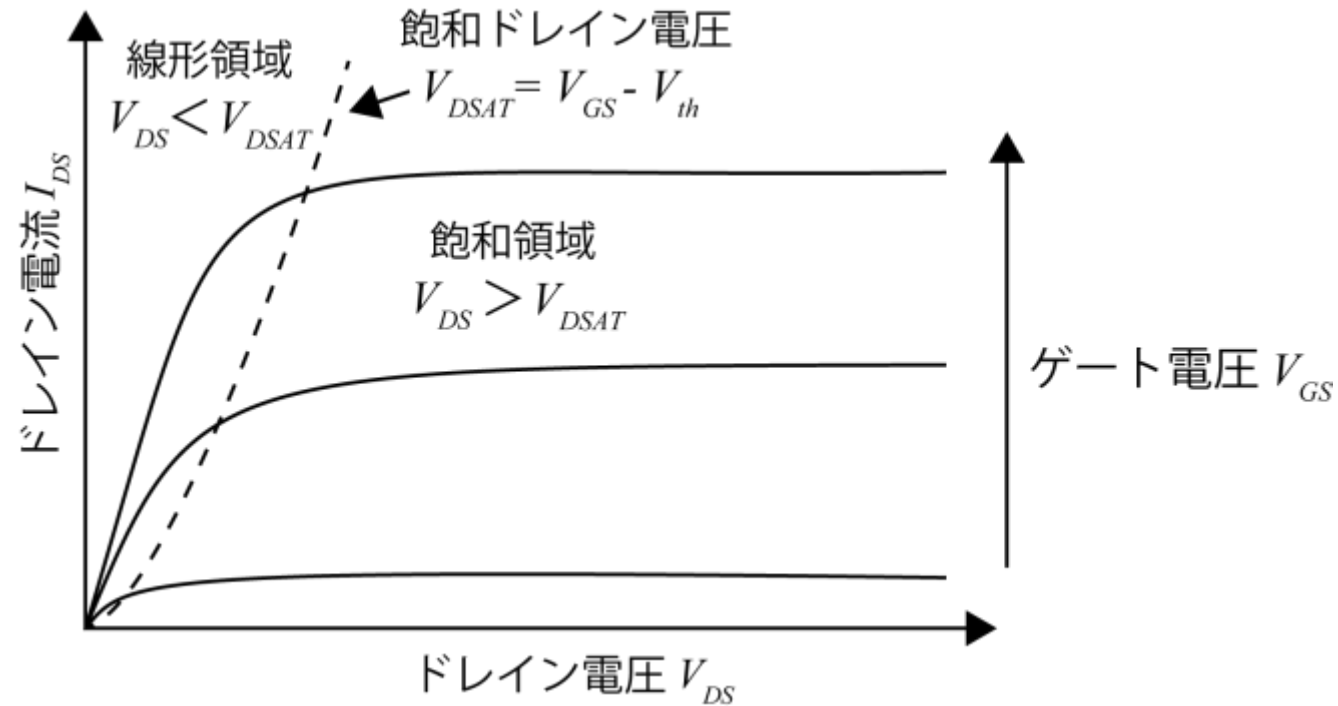
断面図



- ① ゲート電圧 V_g で、
ソース電極からの正孔を注入



- ② ソース・ドレイン間電圧 V_{ds} で、
正孔をソースからドレイン電極へ輸送
→ ドレイン電流 I_{ds} が流れる

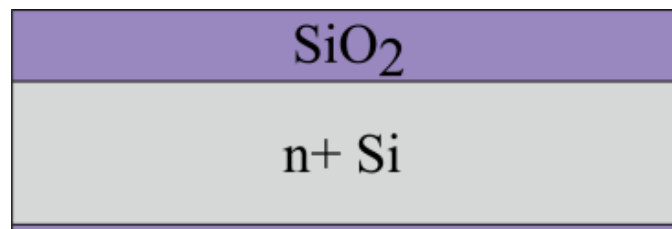


$$I_{DS} = \begin{cases} \beta_n \left[(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2 \right] & (V_{DS} < V_{DSAT} : \text{線形領域}) \\ \frac{\beta_n}{2} (V_{GS} - V_{th})^2 & (V_{DS} > V_{DSAT} : \text{飽和領域}) \end{cases}$$

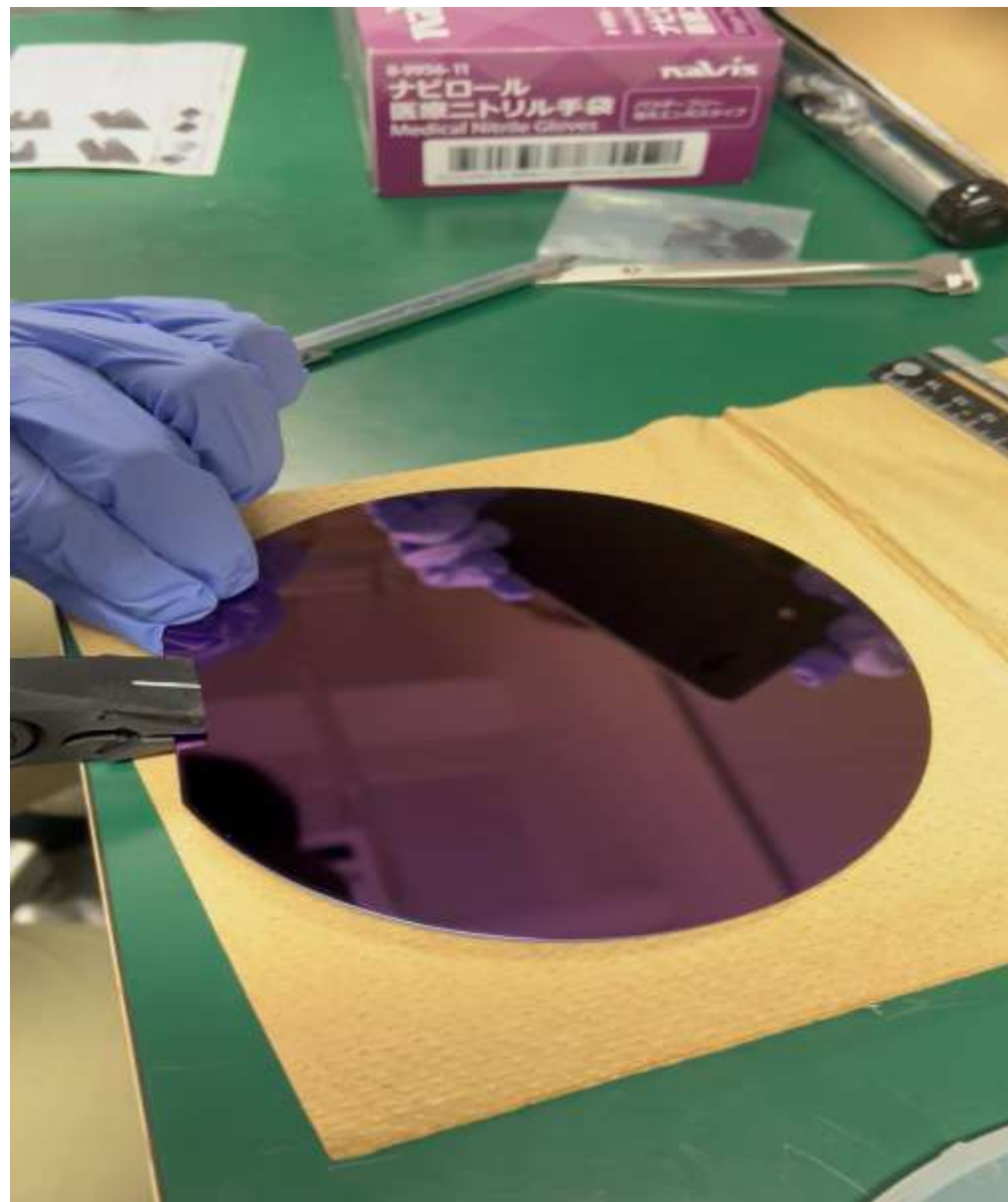
$$\beta_n = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

有機トランジスタの作製方法 シリコン基板の準備129

酸化膜付シリコンウェハを
手割して10mm角のシリコン基板を作る

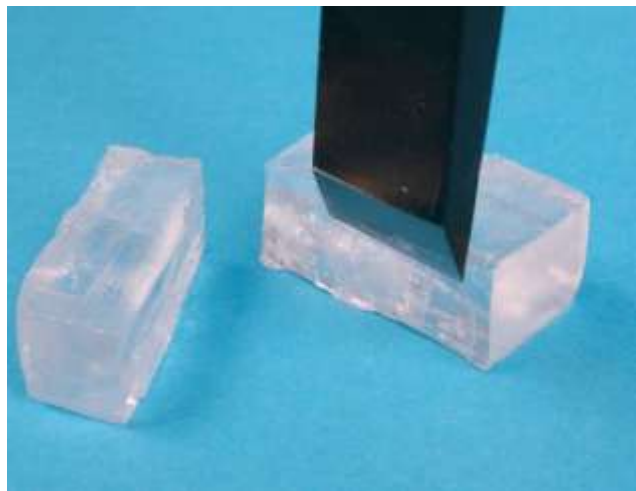


鏡面加工された酸化膜面の淵に
ダイヤモンドペンで切り欠きを作る
へき開プライヤで割る!

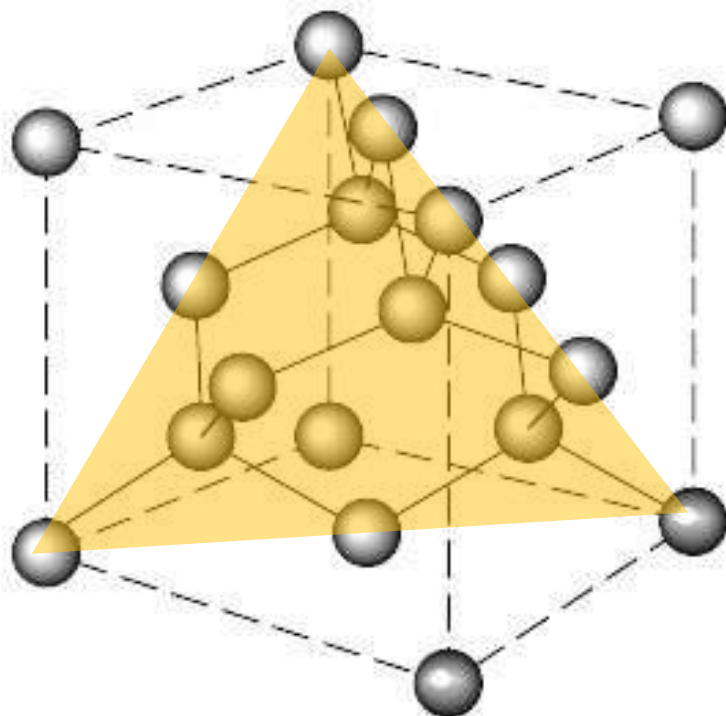


シリコンウエハでは (111) 面に沿ってわずかな傷をダイヤモンドカッタなどで入れ、力をかけると簡単に割れる

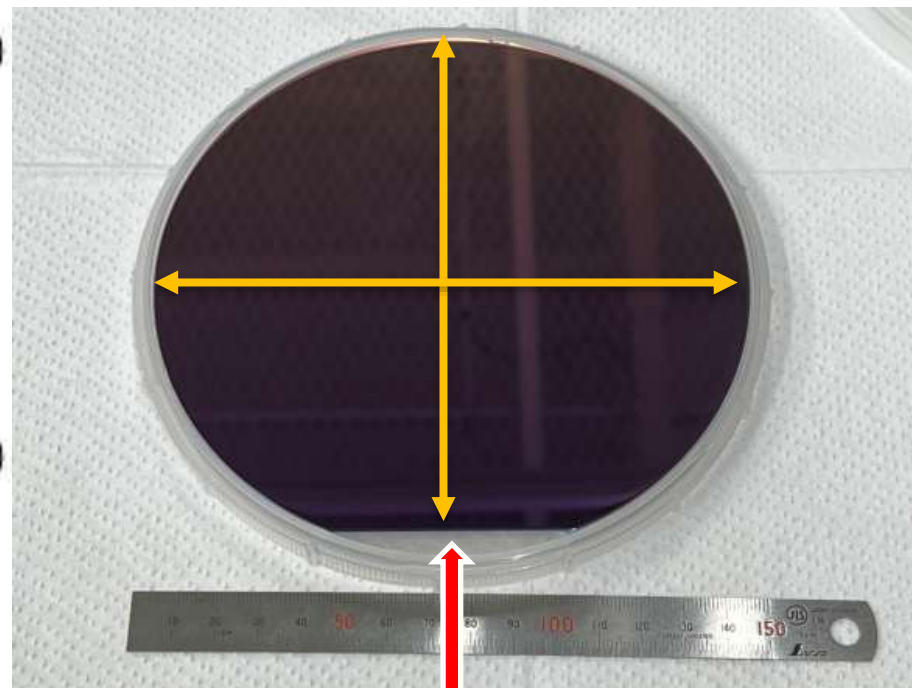
塩化ナトリウムのへき開



<http://www.nta.p-brain.info/30700651/>



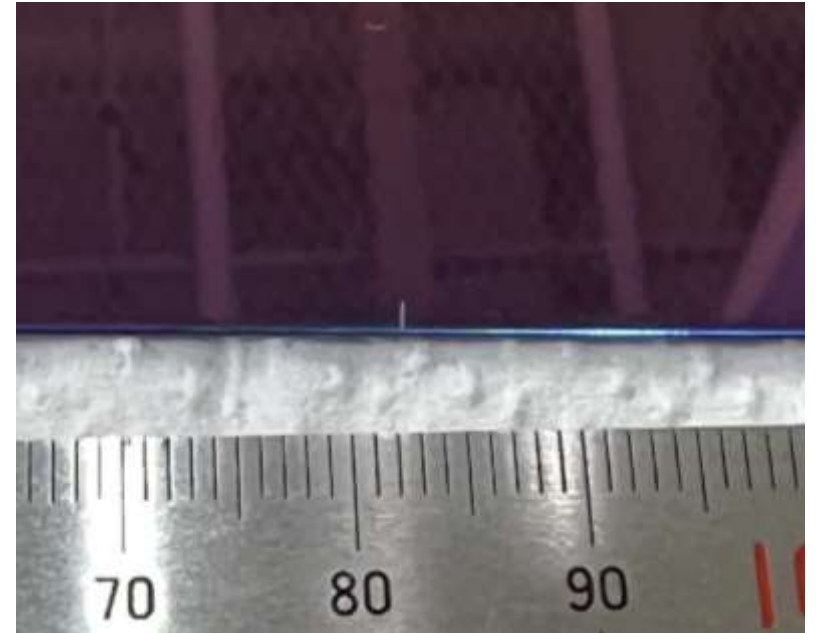
(111)面



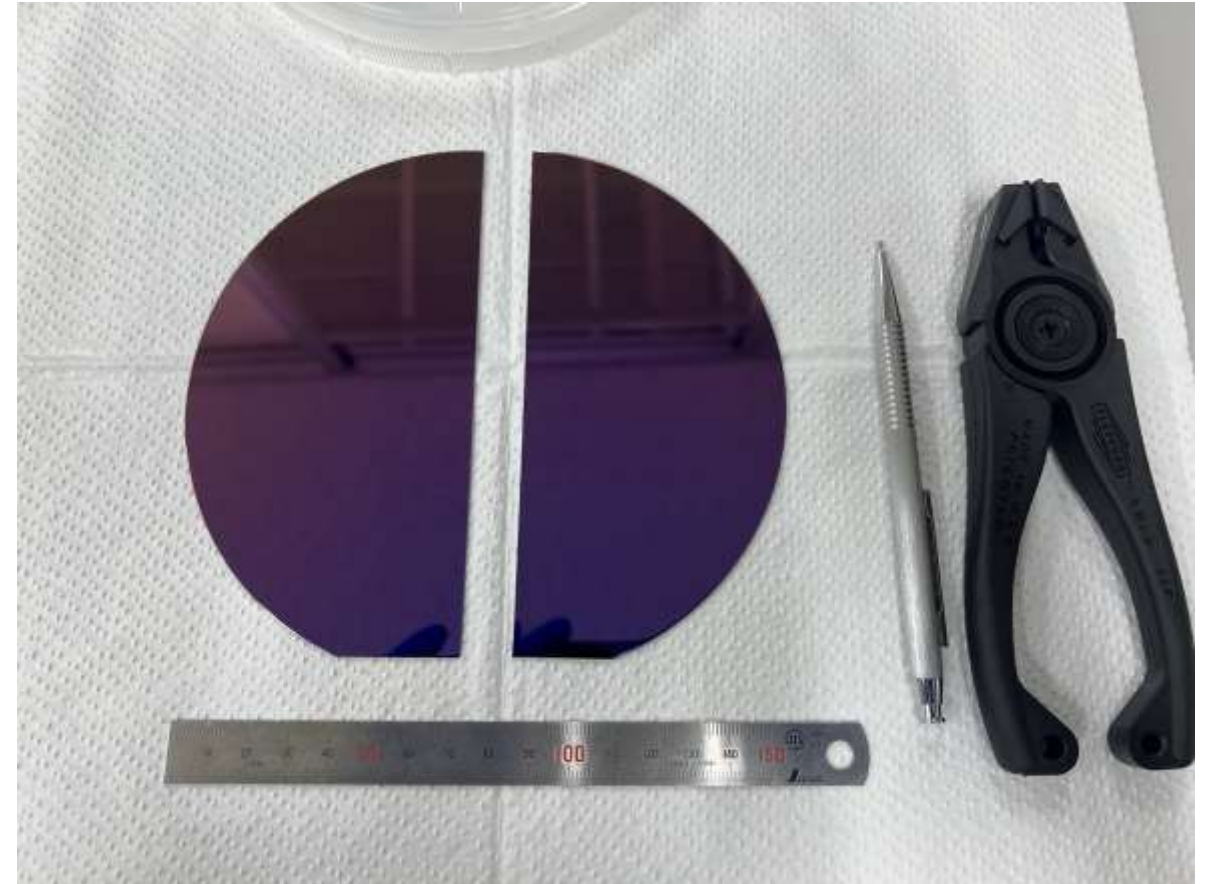
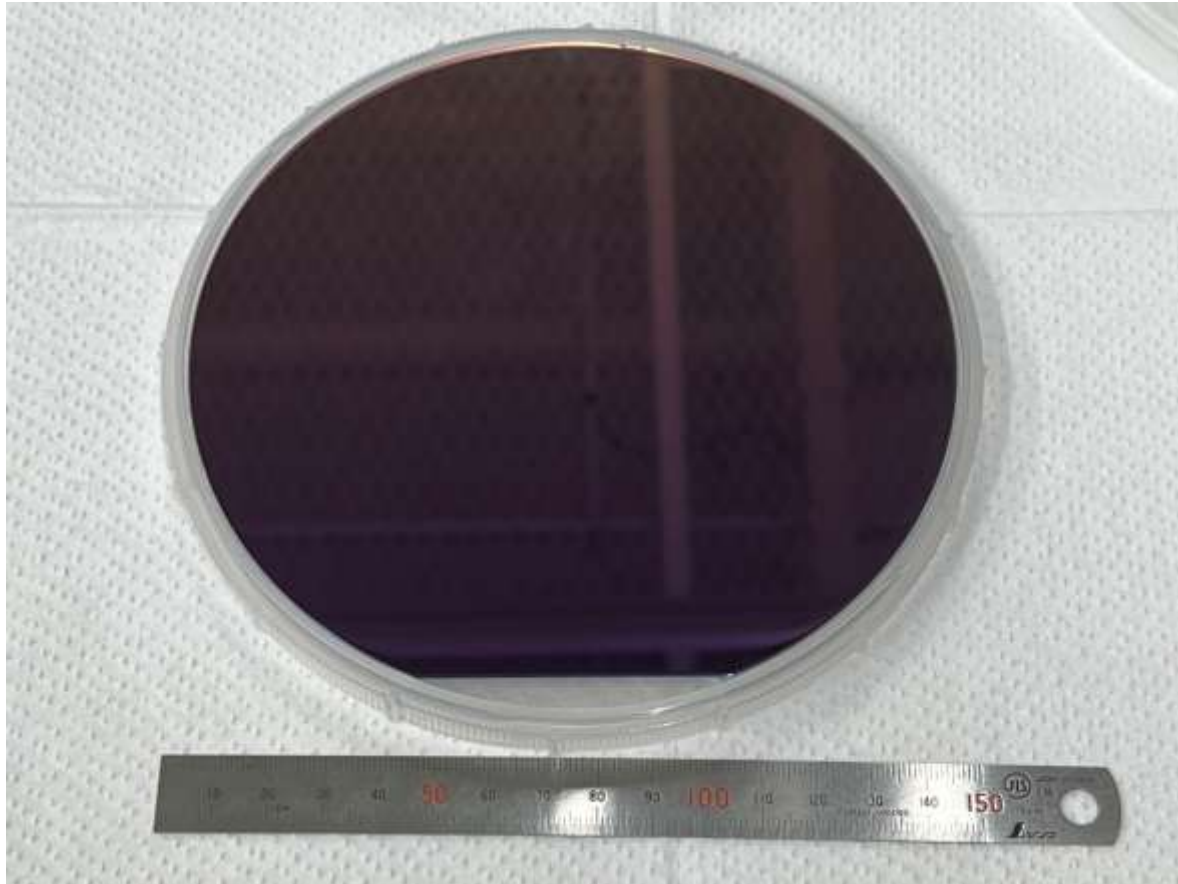
オリフラ

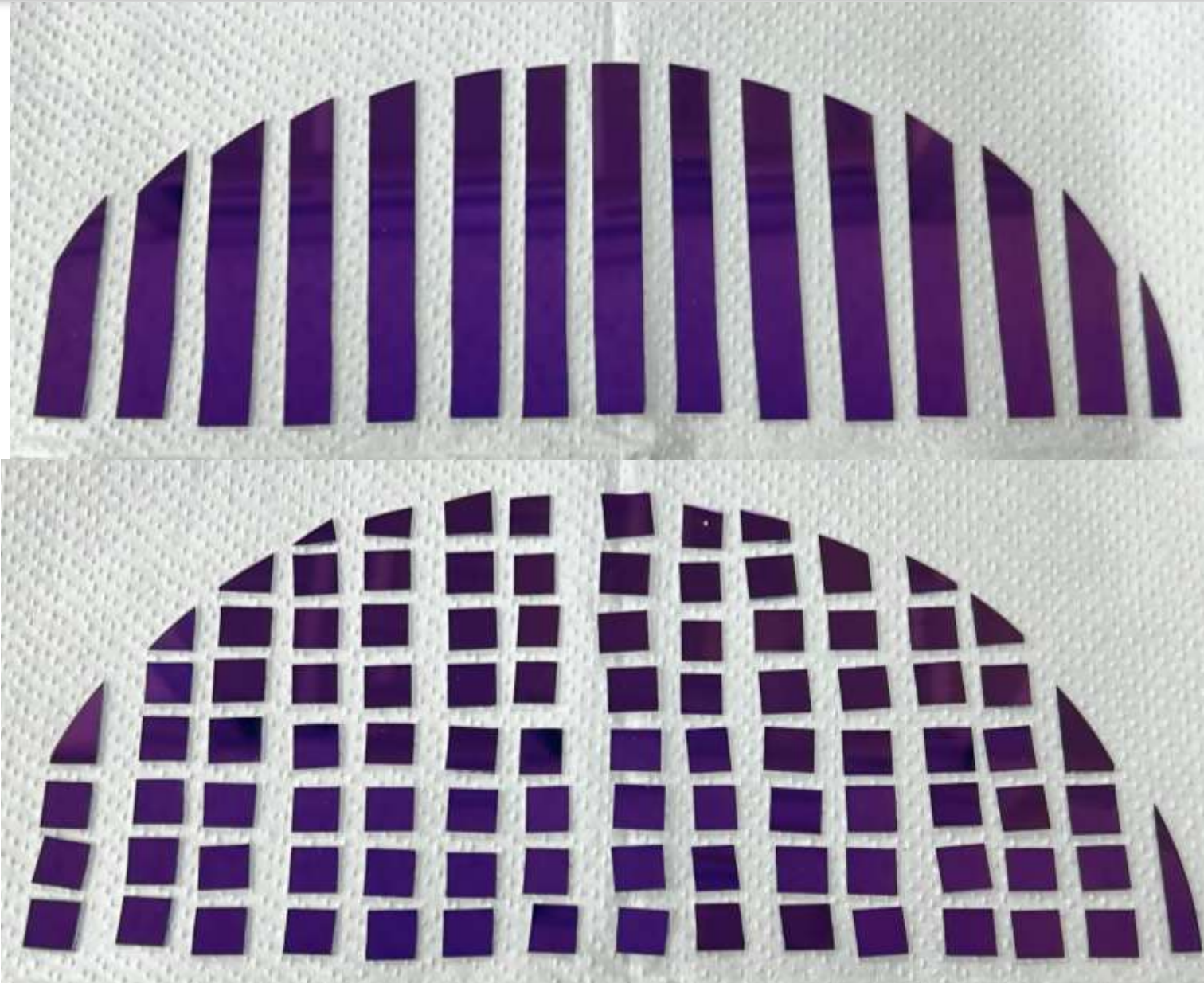
オリフラに対して、垂直・水平方向にへき開する (111面のシリコンウエハ)

シリコンウエハに傷を入れた部分をプライヤーで挟むときれいに割れる



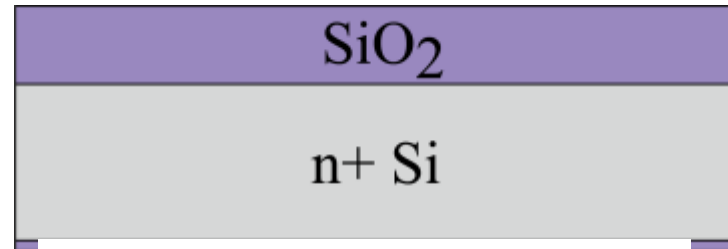
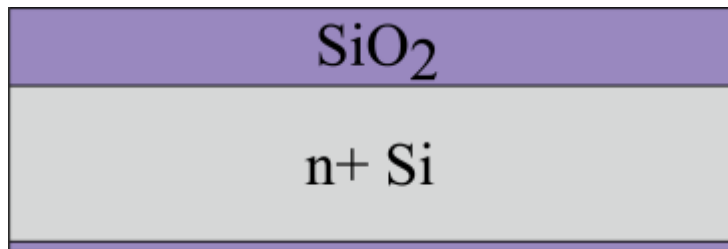
6インチの酸化膜付シリコンウェハを半分に割る





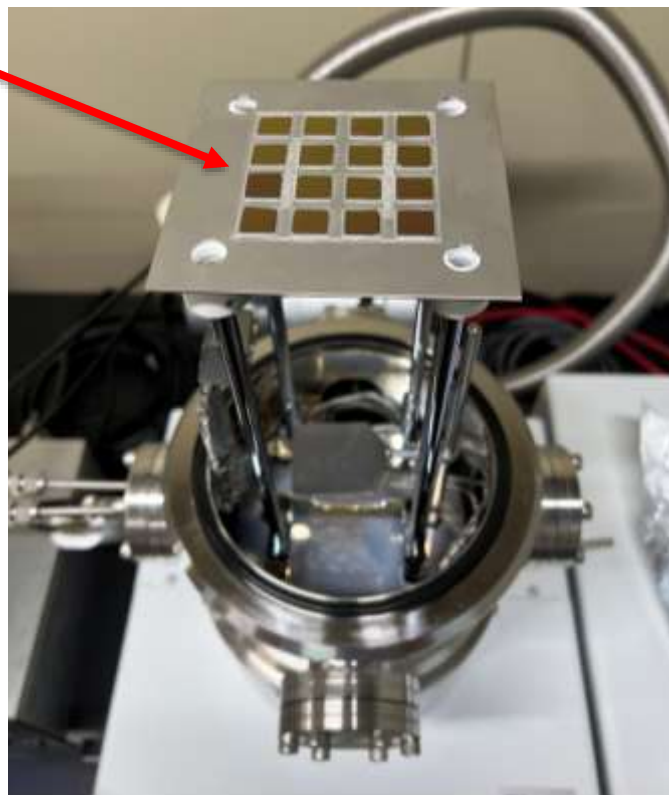


シリコン基板の裏側をダイヤモンドペンで酸化膜を削る

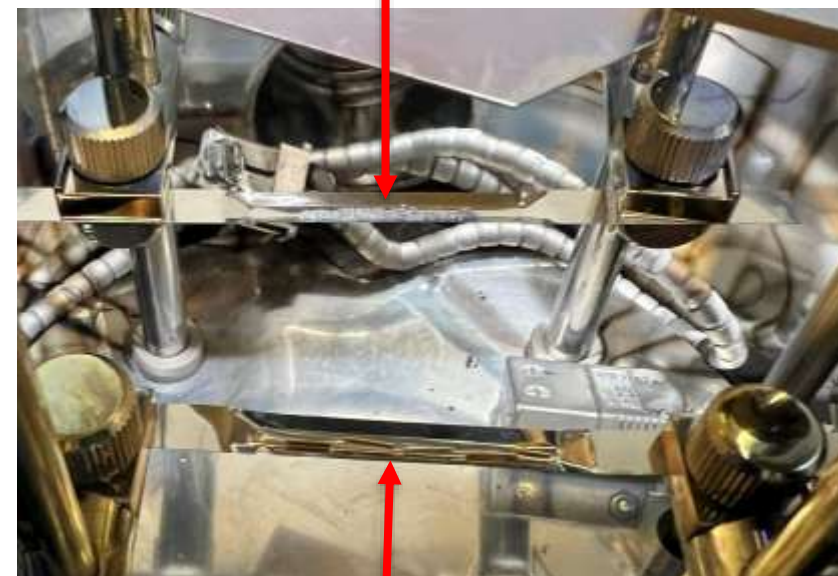




シリコン基板

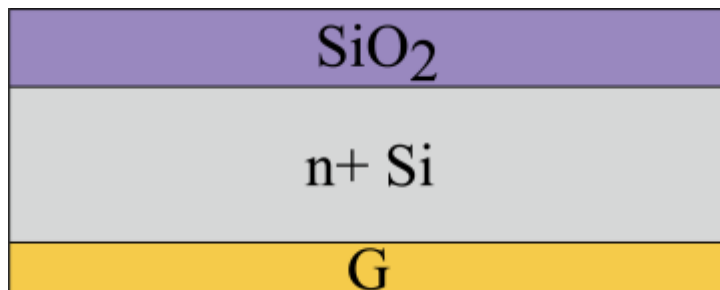


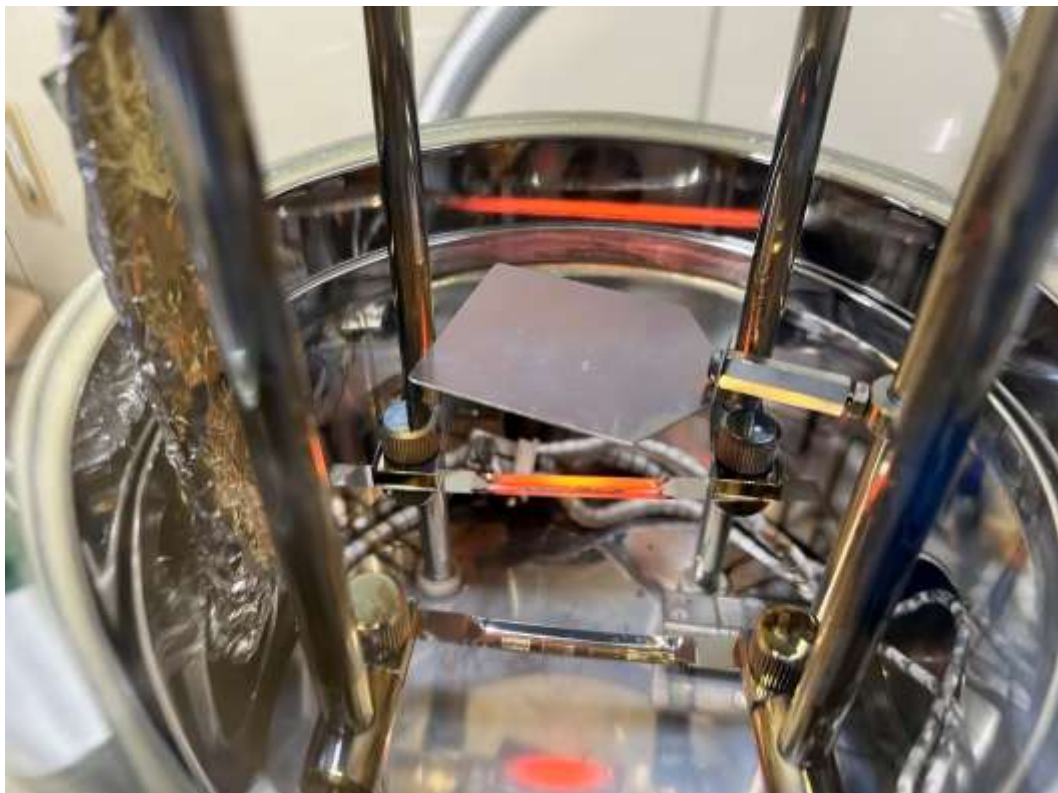
クロム(Cr)



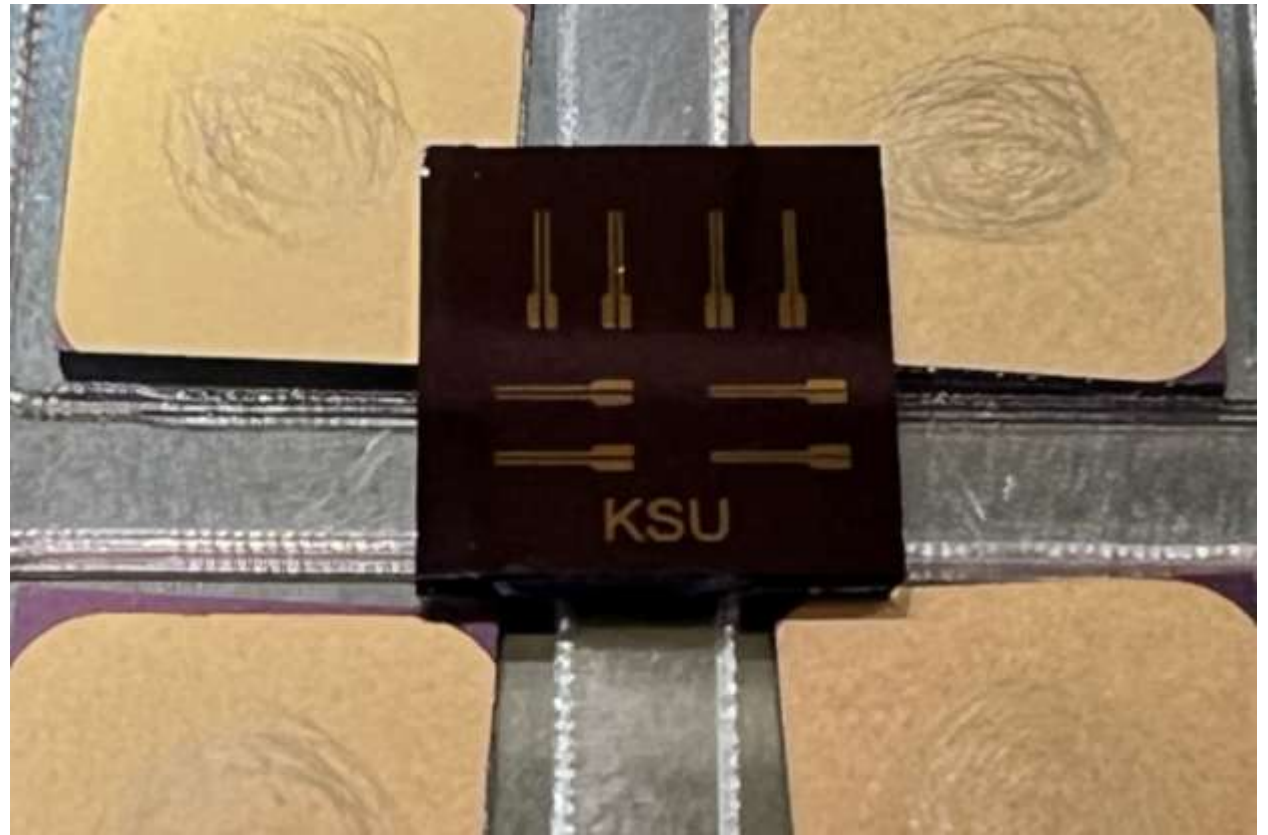
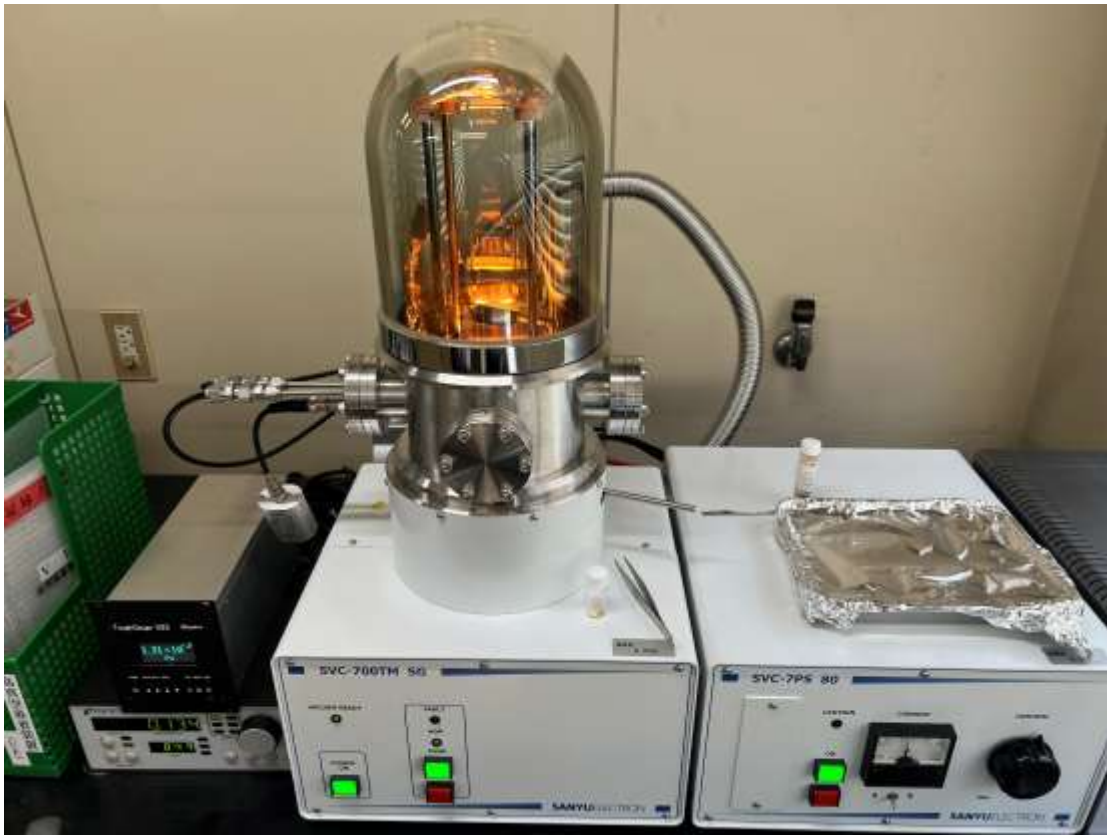
金(Au)

真空金属蒸着器で
ゲート電極としてCr/Auを蒸着
(真空度 1×10^{-5} Torr)

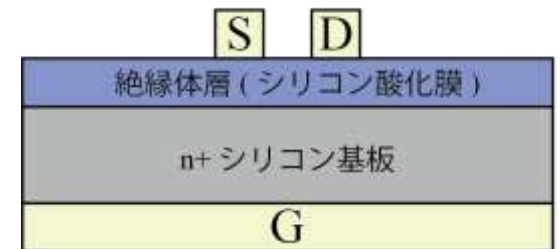




タングステンボードに50A程度の電流を流して、金属を加熱し、シリコン基板へ飛ばす



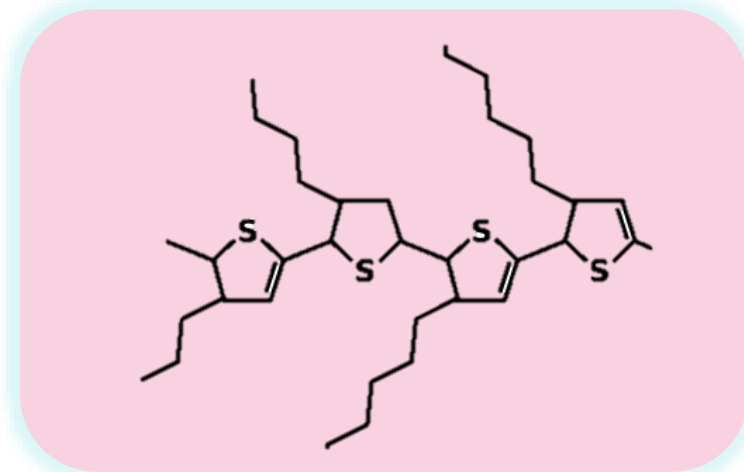
真空金属蒸着器でソース・ドレイン電極としてCr/ Auを蒸着
(真空度 1×10^{-5} Torr)



有機トランジスタの作製方法 有機半導体の溶液準備 138

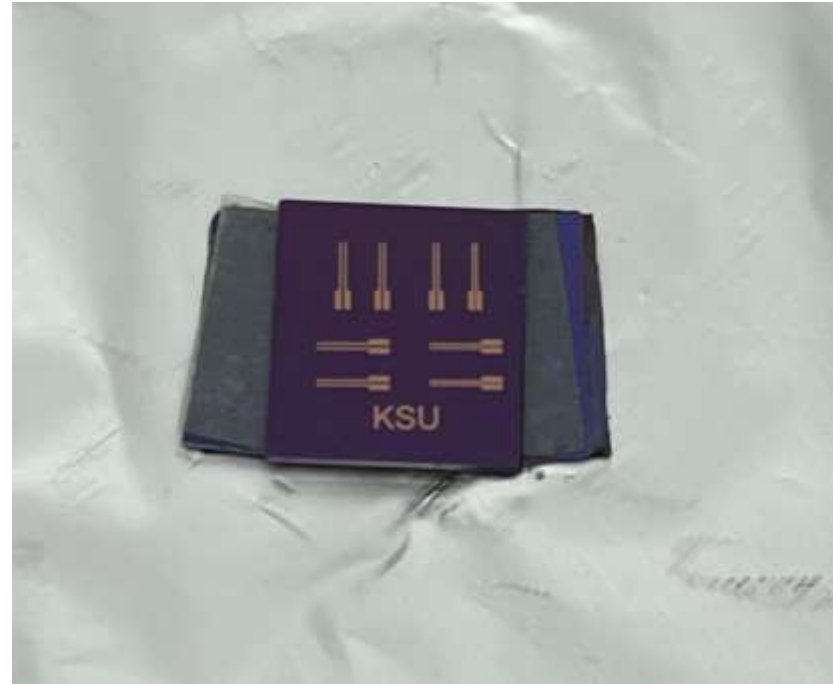
p型有機半導体ポリマー材料

P3HT (ポリ (3-ヘキシルチオフェン-2,5-ジイル))

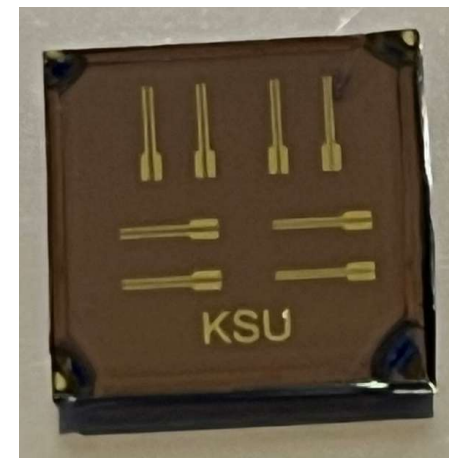
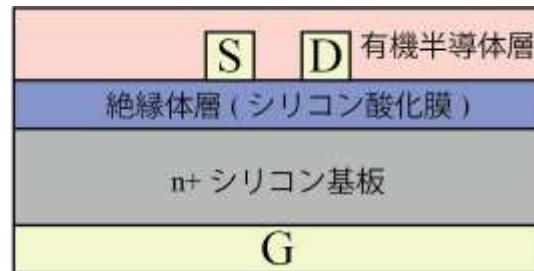
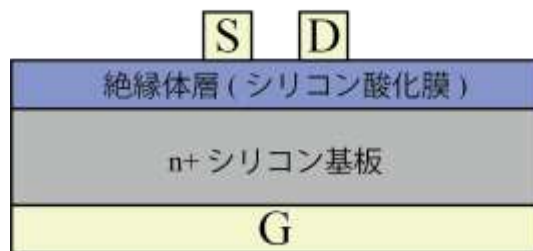


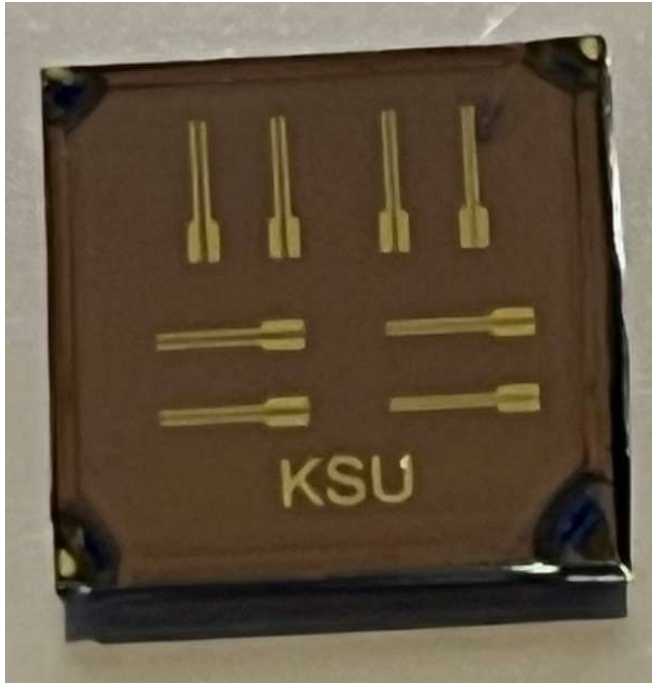
P3HT(12mg)をクロロホルム(1mL)に入れて、よく攪拌する





マイクロピペットを使い溶液をシリコン基板に滴下
スピコータで有機半導体の薄膜を成膜

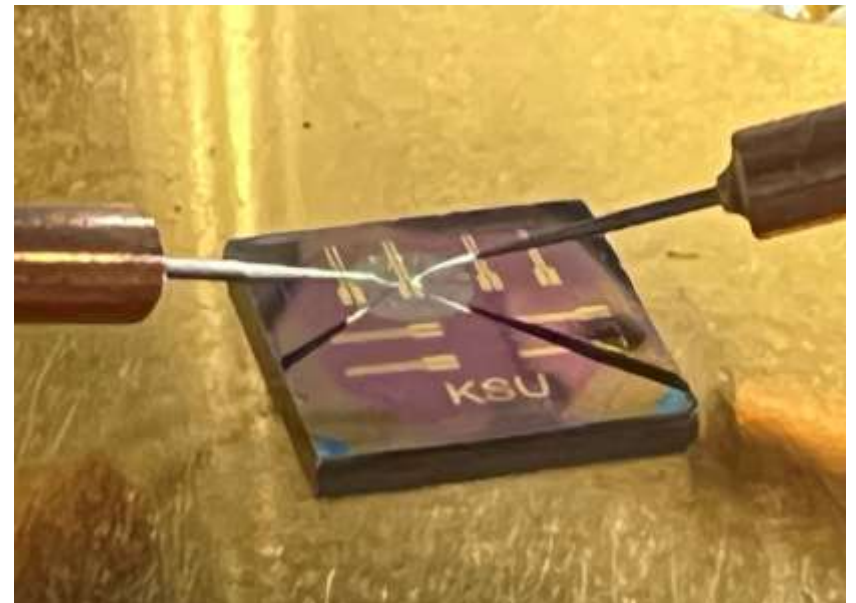
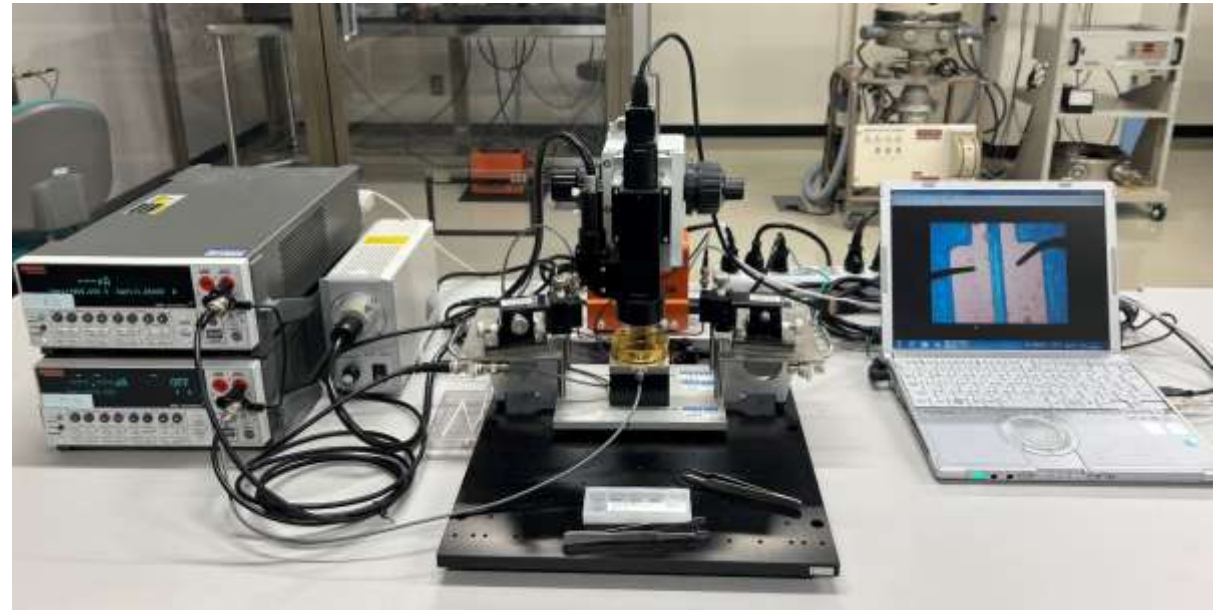
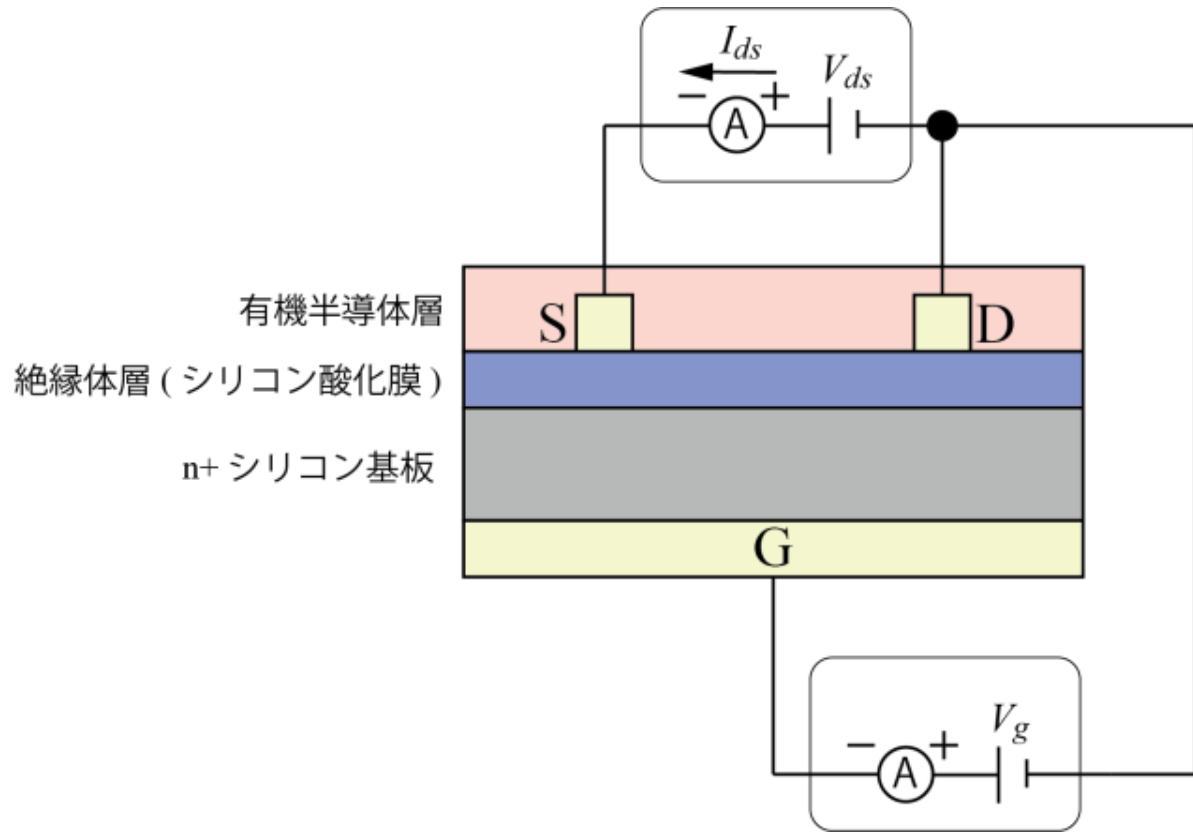




成膜したP3HTの膜状態を電気が流れやすくするために
ホットプレートで加熱処理(120°C 5分)

有機トランジスタの電流特性の測定方法

各電圧を印加し電流を測定するために
ソースメータを接続
あるゲート電圧印加時の
ソース・ドレイン間電圧-ドレイン電流特性を測定



ドレイン電流の大きさが、ゲート電圧やドレイン・ソース間電圧に依存し変化
トランジスタとして電流を増幅できている

