動画・漫画で学ぶ

有機材料・化学



柔らかい電極から、イオンの回路へ

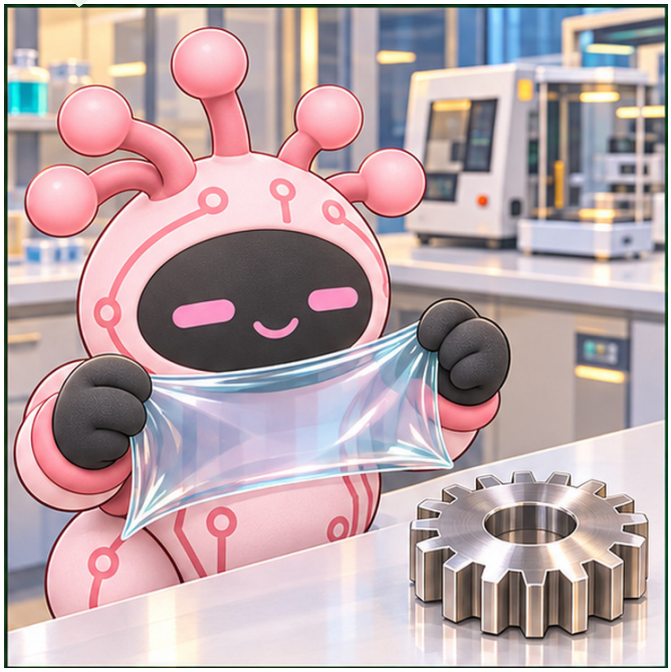
全8章 / 分子設計・材料合成・イオントロニクス・電気化学

歯車と細胞は何でできている？

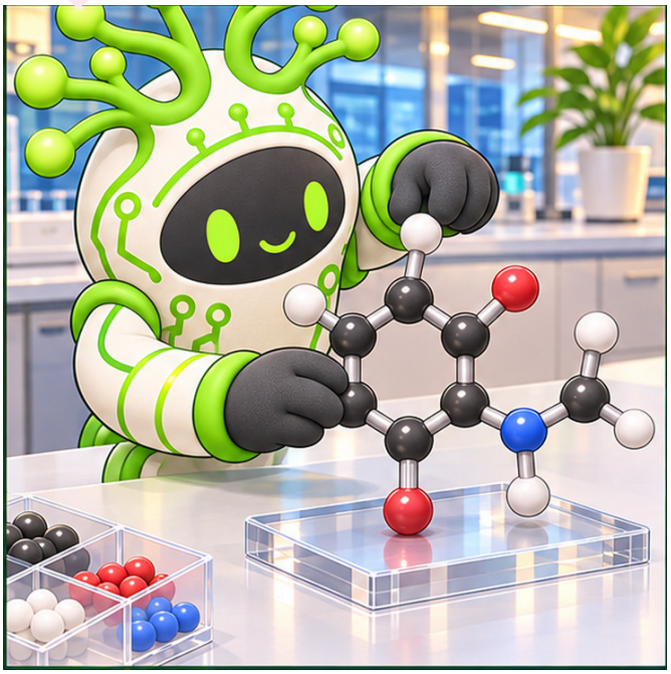
金属の歯車は硬くて丈夫。でも、細胞のそばに置く回路も、同じ材料がいいのかな。



細胞には、水や塩のほかに、タンパク質や脂質などの有機物がある。中心になるのは炭素の骨格だよ。



炭素は鎖や輪をつくれるんだね。そこに水素、酸素、窒素などが組み合わさると、形も働きも変わるの？



そう。空気には窒素や酸素があり、二酸化炭素には炭素、水蒸気には水素がある。元素が同じでも、結びつき方はさまざまだよ。



補足　二酸化炭素には炭素があるが、通常は無機化合物に分類する。生体は水や無機塩も含む。

炭素のシートと糸状の分子

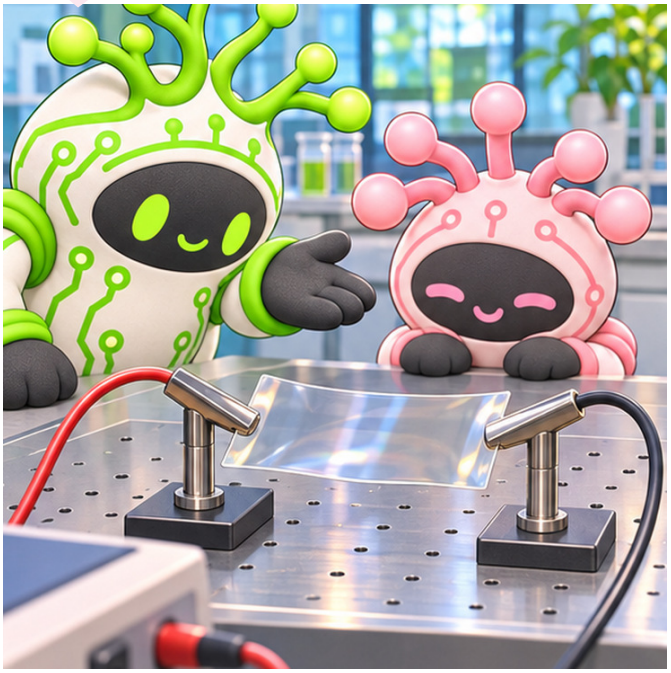
この六角形の網は、炭素原子だけでできているの？　厚さが原子一個分のシートがグラフェンなんだね。



その網を筒にした形がカーボンナノチューブ。巻き方によって、金属のようにも半導体のようにも振る舞うよ。



こっちはインクを塗って作った膜なのに電気が通る！　これも炭素のシートなの？



これは導電性高分子を含むPEDOT:PSS。鎖に沿って電荷を運べる。炭素のシートや筒とは別の材料だよ。



補足　炭素ナノ材料は炭素の同素体で、高分子とは異なる。CNTの電気特性は巻き方などに依存する。

電気を通す道を選ぶ

銅線も、黒いインクの線も、どちらも電流を運べるなら、同じ太さで置き換えられる？

しくみ図 / 材料を選ぶ

金属配線



印刷した高分子膜



長さと断面積をそろえて比較

同じ形でも、同じ抵抗とは限らない。

有機材料・化学 / 01

同じ長さと断面積なら、導電率が高いほど抵抗は小さい。印刷した高分子膜が銅並みに流せるとは限らないよ。

しくみ図 / 材料を選ぶ

金属配線



印刷した高分子膜



抵抗は、導電率と寸法で決まる

同じ形でも、同じ抵抗とは限らない。

有機材料・化学 / 02

薄くて曲げられること、液体から塗れることも、細胞に触れる回路では大切なんだね。

しくみ図 / 材料を選ぶ

金属配線



印刷した高分子膜



薄さ・曲げやすさ・印刷性

同じ形でも、同じ抵抗とは限らない。

有機材料・化学 / 03

金属配線やシリコン半導体と組み合わせ、有機材料で電極やトランジスタをつくる。これが有機エレクトロニクスへの入口だよ。

しくみ図 / 材料を選ぶ

金属配線



印刷した高分子膜



目的に合わせ、材料を組み合わせる

同じ形でも、同じ抵抗とは限らない。

有機材料・化学 / 04

補足　電極や配線の性能は導電率だけでなく、寸法・接続抵抗・曲げ耐性・環境に左右される。

同じ面積でも、表面は違う

上から見ると同じ四角い電極。でも、片方の表面だけ小さな凹凸がいっぱいだ！



液が奥までぬれれば、反応や充電に使える実際の面積が大きくなる。金属でも表面を粗くできるよ。



炭素の六角形が並ぶ面には、平たい芳香族分子を重ねたり、官能基をつけたりできるんだね。



その分子を足場にして触媒を固定すると、狙った物質の反応を電流として読める。何が選択的に反応するかが設計の鍵だよ。



補足　凹凸が電気化学的に使えるかは、ぬれ性・孔の大きさ・測定時間などによって変わる。

電極と水の境目に電荷が並ぶ

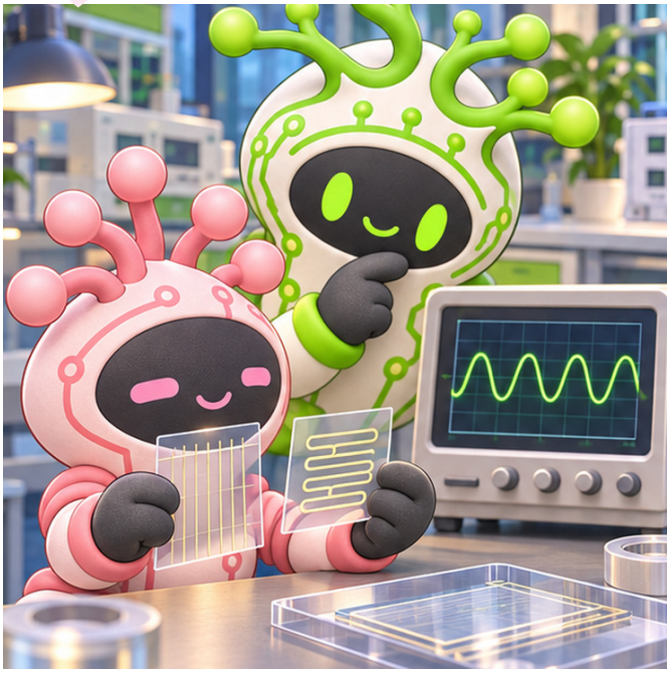
水の中ではイオンが動き、配線では電子が動く。この境目で、どうやって電気が伝わるの？



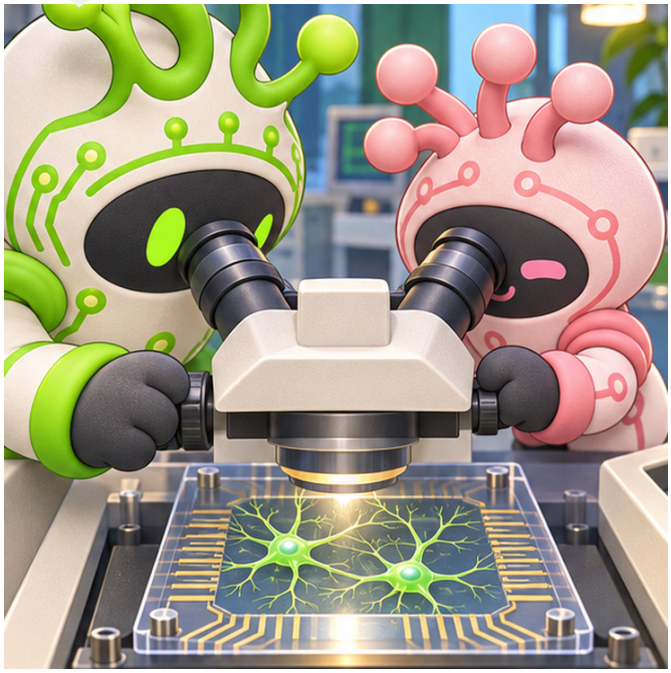
電極の電荷のすぐ向かいに、反対符号のイオンが集まる。電気二重層という小さなコンデンサができるんだ。



使える面積が増えると容量も増えやすいね。電荷をためて戻すだけなら、物質を変化させずに刺激を与えられる？



適切な電位範囲なら、容量性の刺激でガスを生じる反応を抑えられる。低いインピーダンスは計測にも役立つよ。



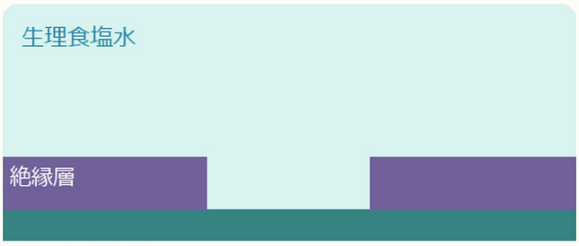
補足　容量性電流と酸化還元によるファラデー電流を区別する。刺激時は電位・パルス・材料の安定範囲を考える。

研究例：透明な電極の窓

電極を小さくすると、細胞のそばだけを測れる。でも表面積が減ったら、信号が雑音に埋もれない？

しくみ図 / 透明な電極の窓

断面で見る / 電極と溶液の接点



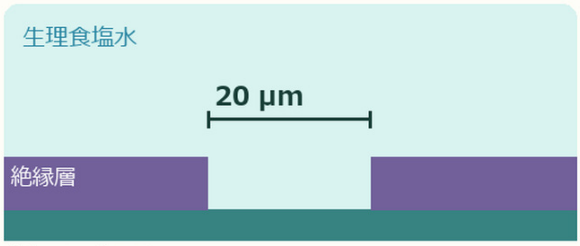
露出する場所を小さく絞る

有機材料・化学 / 01

吉田研究室では透明な有機電極を印刷し、絶縁膜に一辺20マイクロメートルの窓を開けたよ。

しくみ図 / 透明な電極の窓

断面で見る / 電極と溶液の接点



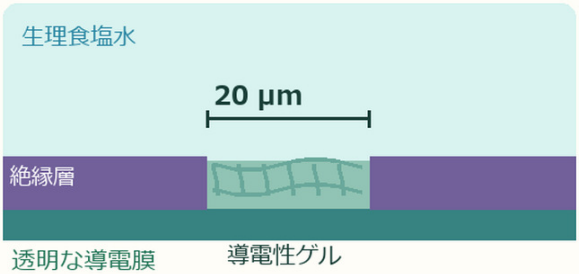
正方形の窓だけが水に触れる

有機材料・化学 / 02

その窓を導電性のゲルで埋めると、水と接触しやすくなるんだね。透明なら、上の細胞も観察できる！

しくみ図 / 透明な電極の窓

断面で見る / 電極と溶液の接点



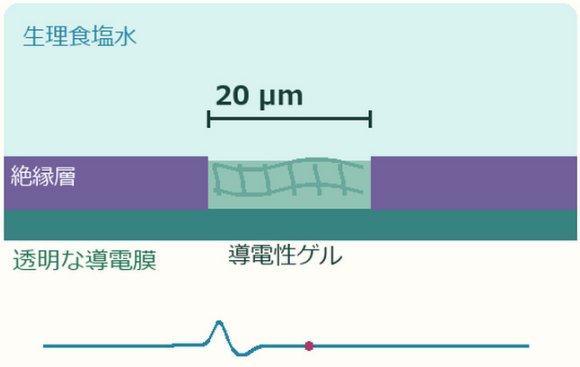
窓のくぼみにゲルを加える

有機材料・化学 / 03

神経モデル細胞を観察し、生理食塩水で神経信号を模した入力を記録できた。実際の神経活動の記録は次の課題だよ。

しくみ図 / 透明な電極の窓

断面で見る / 電極と溶液の接点



神経信号を模した試験入力

有機材料・化学 / 04

補足　村上・吉田（2026）。熱雑音は測定帯域とインピーダンスの実部に依存する。細胞の実信号計測は今後の課題。

水につかったトランジスタ

水にゲート電極が浸かっていて、その下の薄膜の両端にソースとドレインがある。これは何？



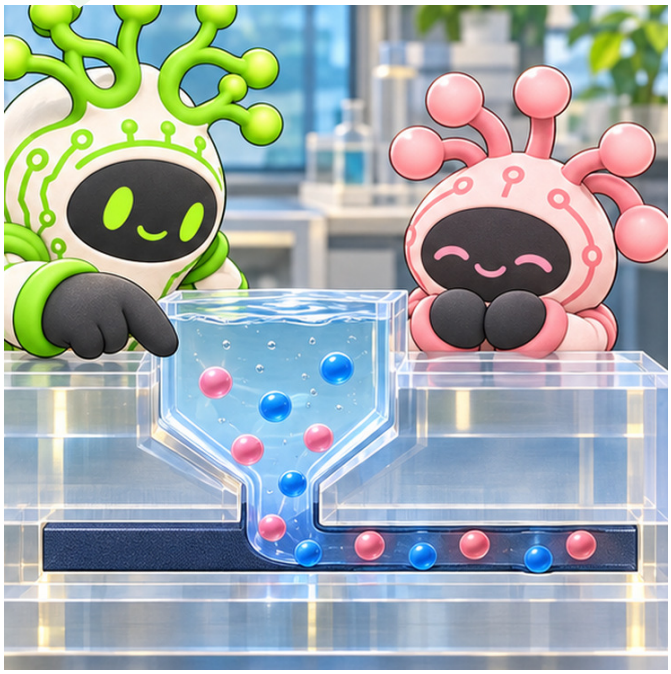
有機電気化学トランジスタ、OECTだよ。ソースとドレインの間の薄膜が、電流の通り道、つまりチャネルになる。



チャネルは電解質に触れているんだね。中でイオンも電子的な電荷も動く材料を、OMIECと呼ぶの？



そう。有機混合イオン電子伝導体のことだよ。代表例はPEDOT:PSS。水を含む膜の内部に、二種類の電荷の道がある。



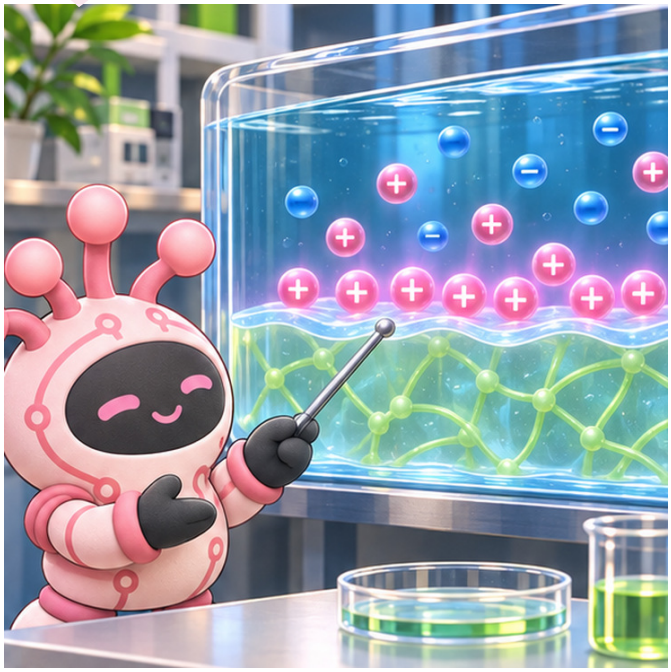
補足　OECT = organic electrochemical transistor。OMIEC = organic mixed ionic–electronic conductor。

表面と内部、どこで制御する？

普通の有機電界効果トランジスタ、OFETでは、ゲートと半導体の間に固体の絶縁層があるよ。



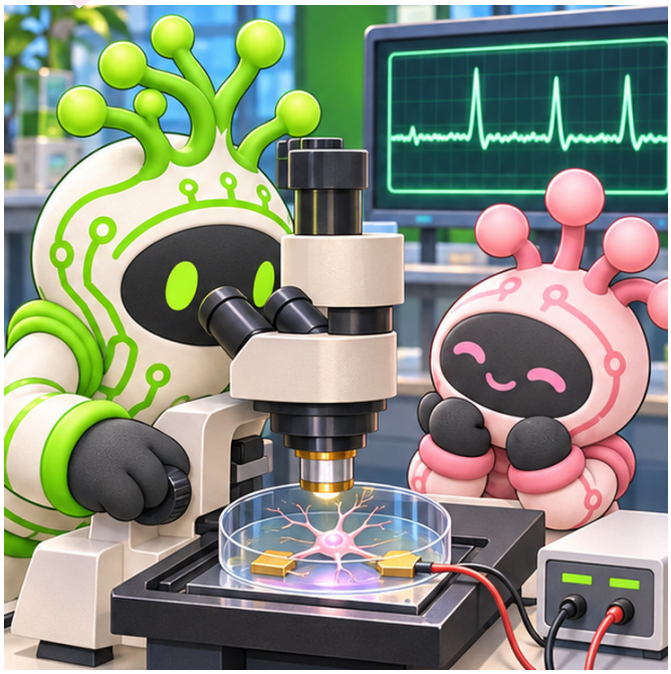
電解質を使うEGOFETでは、界面の電気二重層が効くのね。主に半導体の表面付近の電荷を変えるんだ。



OECTでは、イオンがチャネル内部まで出入りできる。膜の体積を使って、電流の流れやすさを変えられるよ。



細胞がつくる小さな電位変化も、チャネルに流れる電流の変化として取り出せるんだ。増幅には電源と動作点も必要だね。

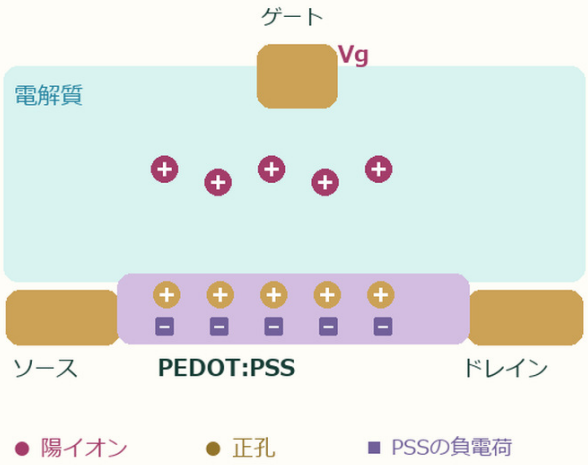


補足　三つの構造の理想的な比較。材料・バイアス・時間によって、界面と体積の寄与は重なりうる。

正のゲートで電流が減る理由

正のゲート電圧をかける前から、PEDOTの鎖には正孔があるよ。正孔が移動するので電流が流れるんだ。

しくみ図 / 有機トランジスタ

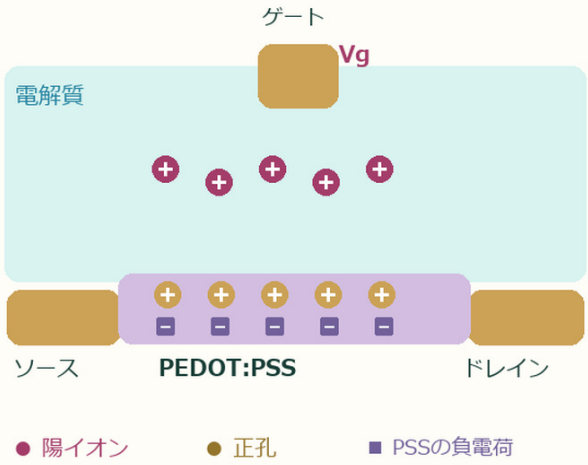


ゲート印加前：正孔が多い

有機材料・化学 / 01

PSSのスルホン酸基は負に帯電して、正のPEDOTとつり合う。膜ぜんぶが負に帯電しているわけじゃないんだね。

しくみ図 / 有機トランジスタ

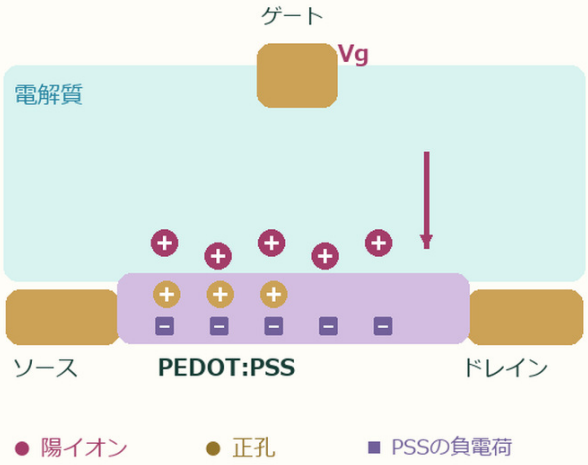


PEDOTとPSSの電荷がつり合う

有機材料・化学 / 02

ゲートをソースより正にすると、電解質の陽イオンが水を含む膜に入る。PSSの負電荷を補い、PEDOTの正孔が減るよ。

しくみ図 / 有機トランジスタ

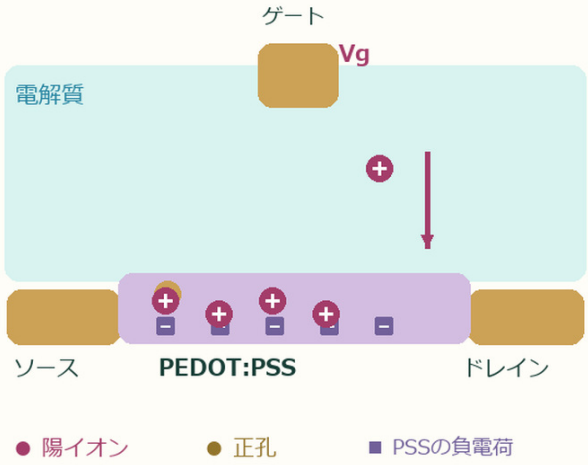


陽イオンが膜内に入る

有機材料・化学 / 03

同じドレイン電圧で比べれば、チャネルの抵抗が上がり、電流の大きさは下がる。イオンの出入りで電子回路を制御できた！

しくみ図 / 有機トランジスタ



正孔が減り、電流が小さくなる

有機材料・化学 / 04

補足　正孔を運ぶp型のPEDOTと、固定負電荷を持つPSS。代表的な空乏型OECTで、ドレイン電圧は一定。

光の当たったところだけゲルに

透明な立方体を押すと形が戻る。こんなに水を含んでいるのに、どうして流れ出さないの？



長い高分子の鎖がところどころで結ばれ、網目になっているからだよ。網の中に水を抱えたものがハイドロゲル。



光で結び目をつくる材料に、マスク越しに光を当てれば、光の当たった部分だけに網目ができるんだね。



未反応の液を洗い流すと、小さなゲルの模様が残る。細胞ほどの幅の島や流路を、狙った場所に作れるんだ。



補足　光開始剤・波長・露光量・架橋剤は材料に合わせる。光を当てればどの高分子も固まるわけではない。

細胞が付く島、動くゲル

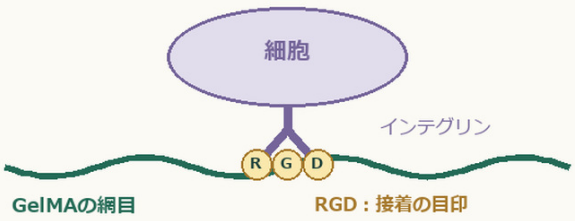
GelMAでは、ゼラチンの鎖に残ったRGDという目印を、細胞表面のインテグリンがつかむ。細胞が足場に接着できるんだ。

材料の分子模型 · 01 / 03

GelMA｜細胞がつかむ足場

ゼラチンのペプチド鎖に残る接着配列

··· — Arg — Gly — Asp — ···



接着配列を、細胞の受容体が認識

Arg：アルギニン　Gly：グリシン　Asp：アスパラギン酸

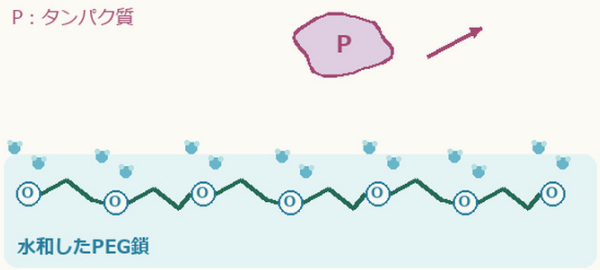
PEGDAで作ったゲルは、鎖の酸素のまわりに水が集まるのね。未修飾の表面では、タンパク質が近づいても吸着しにくいんだ。

材料の分子模型 · 02 / 03

PEGDA｜水をまとう表面

ゲルをつくるPEG部分の繰り返し（n は繰り返し数）

— (CH_2 — CH_2 — O)n —



水和した鎖が、非特異的な吸着を抑える

未修飾ゲルの例。タンパク質や溶液の条件で吸着量は変わる。

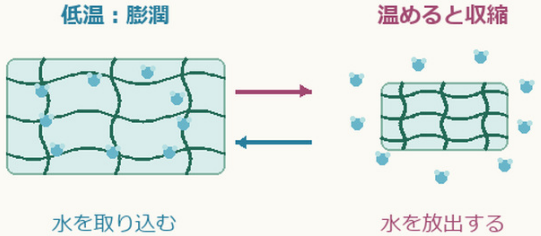
PNIPAMのゲルを水中で温めると、鎖が寄り、水が出て縮む。冷やすと水を取り込んでまた膨らむ。この往復を動きに使えるよ。

材料の分子模型 · 03 / 03

PNIPAM｜水が出入りする網

繰り返し単位：アミド基とイソプロピル基

[— CH_2 — CH(C(=O)NHCH(CH_3)$_2$) —]n



温めて縮め、冷やして膨らませる

水中では約32 ℃が目安。組成や溶液によって変わる。

全部をゲルにする必要はないんだ。溶媒を含まないゴム状の絶縁体を加工すれば、電極の窓だけを残して配線を覆えるね。



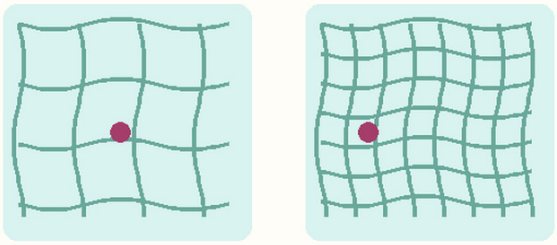
補足　細胞の受容体が、ゼラチン鎖の特定の配列を認識する。

同じ模様でも、配合で働きが変わる

同じ形のゲルを二つ作ったのに、片方が硬い。塗った溶液の濃度が違っていたよ。

しくみ図 / ゲルの配合

同じ外形の、二つの網目



結び目が疎　　結び目が密

出発点：配合の異なるゲル

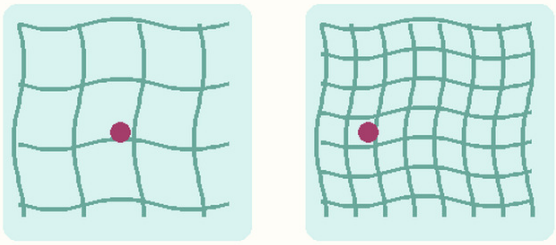
粒の移動は、拡散する分子の例。

有機材料・化学 / 01

高分子の量や架橋の度合いを変えると、網目の間隔や含水率も変わる。分子が通れる速さにも影響するんだ。

しくみ図 / ゲルの配合

同じ外形の、二つの網目



結び目が疎　　結び目が密

架橋密度で網目の大きさが変わる

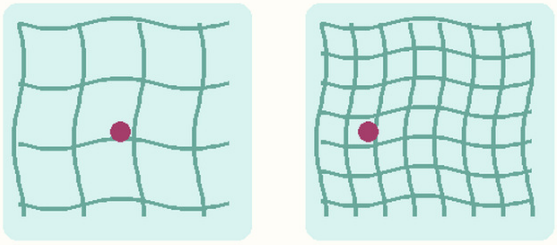
粒の移動は、拡散する分子の例。

有機材料・化学 / 02

細胞を付ける場所、薬が通る場所、絶縁したい場所で、それぞれ材料と作り方を選ぶんだね。

しくみ図 / ゲルの配合

同じ外形の、二つの網目



結び目が疎　　結び目が密

目的に応じて拡散と硬さを調整

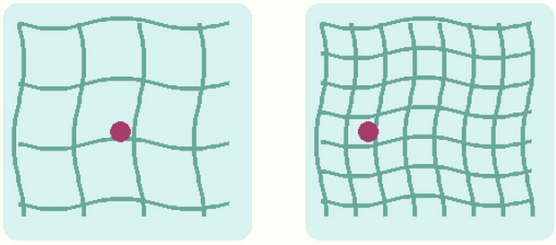
粒の移動は、拡散する分子の例。

有機材料・化学 / 03

そう。濃度だけを変えて比較するなど、一度に調べる条件を絞ろう。形、硬さ、電気特性を測って設計に戻るよ。

しくみ図 / ゲルの配合

同じ外形の、二つの網目



結び目が疎　　結び目が密

比較するときは条件を一つずつ

粒の移動は、拡散する分子の例。

有機材料・化学 / 04

補足　濃度、架橋密度、露光量を区別する。材料によって硬さ・含水率・拡散・細胞接着への影響は異なる。

細胞にとっての小さな環境

直径が10マイクロメートルほどの細胞にとって、周りの高分子はどんな景色なんだろう？



一本の鎖の太さはナノメートルの世界。たくさん集まった繊維や網目が、水を含むマイクロメートルの足場になるよ。



この環境の硬さ、形、接着しやすさが変われば、細胞のふるまいも変わる。電荷も選べるの？



選べるよ。網目に固定された正や負の電荷があると、まわりのイオンの分布が変わる。細胞とやり取りする新しい手掛かりだ。



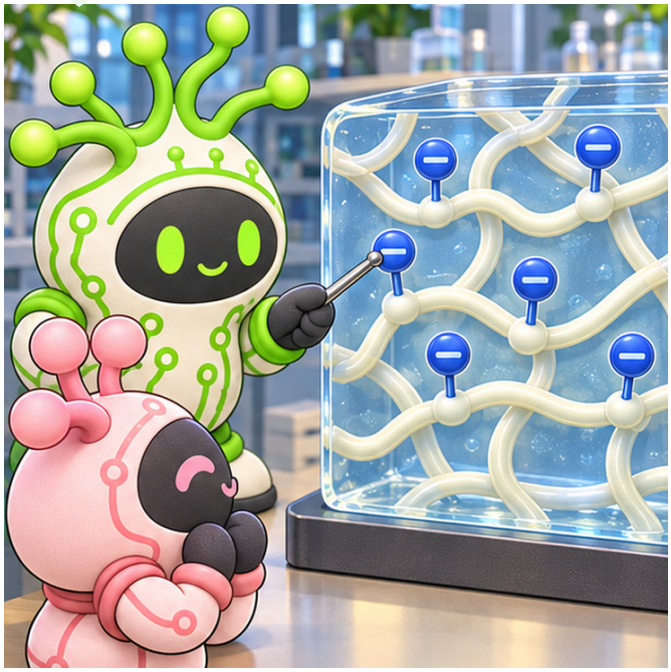
補足　細胞の大きさには幅がある。10 μmは代表的な比較尺度であり、分子鎖の太さや網目の大きさとは異なる。

移動する電荷、動けない電荷

塩を含む中性のゲルに電場をかけたら、陽イオンは陰極へ、陰イオンは陽極へ動く。向きは反対だね。



電場で荷電粒子が移動するのが電気泳動。両方のイオンが水和していても、同じ量の水が必ず相殺されるとは限らないよ。



では網目に負電荷が固定されていたら？　動けないマイナスの近くには、反対符号の陽イオンが多くなるね。



これが対イオンだよ。同符号のイオンは入りにくくなるけれど、完全にゼロとは限らない。塩濃度や固定電荷の密度が効くんだ。

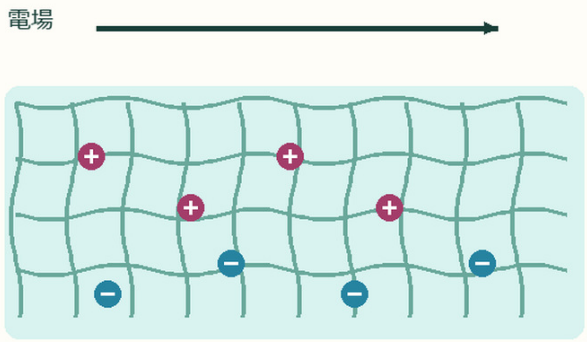


補足　中性の均一なゲルで壁・圧力差・濃度勾配などの効果が小さい場合を基準とする。

対イオンが水を連れていく

電場を右向きにそろえて比べよう。中性ゲルでは陽イオンが右、陰イオンが左。電流はあっても、大きな水流は必須ではないよ。

しくみ図 / ゲルを流れるイオンと水



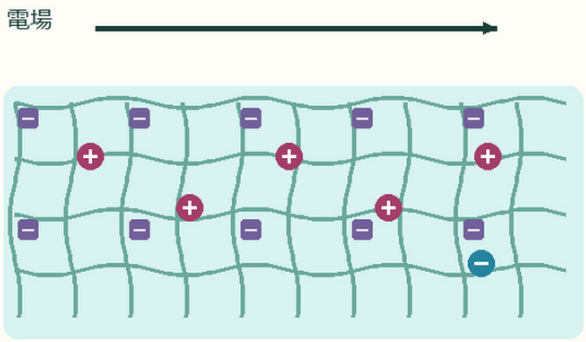
中性：陽・陰イオンが逆方向へ

丸＝移動イオン　紫の四角＝固定負電荷

有機材料・化学 / 01

負に帯電したゲルでは、右へ進む陽イオンの方が多いんだね。動くイオンが周りの水に力を伝えると？

しくみ図 / ゲルを流れるイオンと水



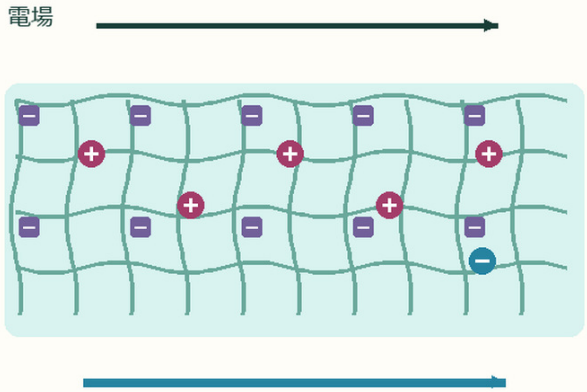
固定負電荷：陽イオンが多い

丸＝移動イオン　紫の四角＝固定負電荷

有機材料・化学 / 02

ゲルのすき間の水に、全体として右向きの流れが生まれうる。電場が液体の流れを駆動する、これが電気浸透流だよ。

しくみ図 / ゲルを流れるイオンと水



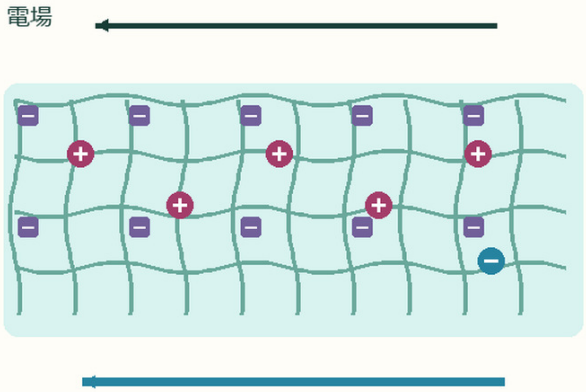
電気浸透：水の正味の流れ

丸＝移動イオン　紫の四角＝固定負電荷

有機材料・化学 / 03

イオンの移動そのものと、水の流れを区別できた！　電場を逆にして、色素の移動も測れば、向きを確かめられそう。

しくみ図 / ゲルを流れるイオンと水



電場を反転：流れの向きも反転

丸＝移動イオン　紫の四角＝固定負電荷

有機材料・化学 / 04

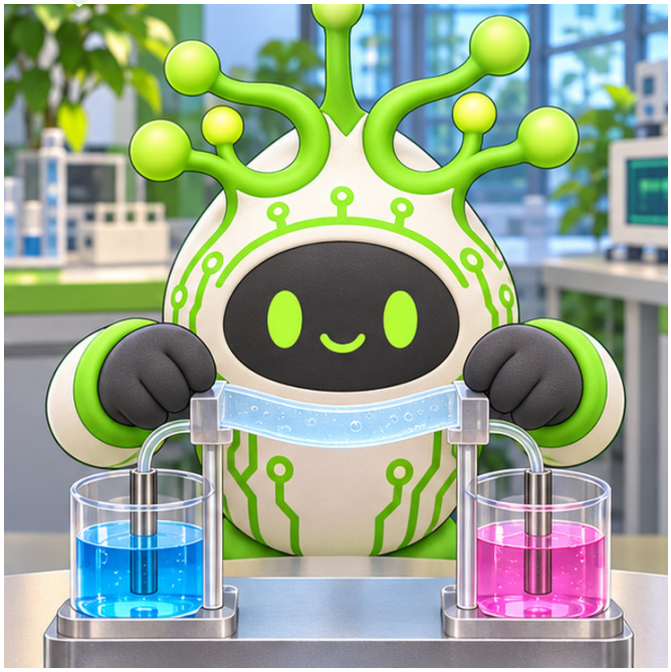
補足　説明図は負に帯電したゲルで電場を右向きにした例。正の固定電荷なら陰イオンが優勢になり、向きが変わりうる。

電気信号が、運ぶ物質を選ぶ

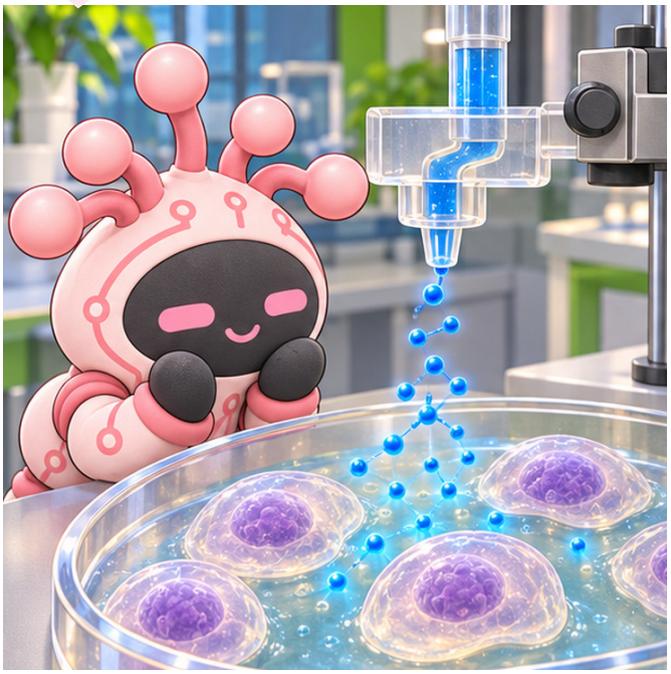
金属配線が運ぶのは電子。イオンの回路なら、電荷と一緒に物質そのものを運べるんだね。



電圧や膜の選択性でイオン電流を操る技術を、イオントロニクスと呼ぶ。選択的な膜を通じて、荷電した薬の分子も送れるよ。



水をポンプで押し流さなくても、電気泳動で目的の分子を届けられるんだ。どれだけ届いたかは、測って確かめるのね。



イオンは水や高分子の中を移動するので、電子回路ほど高速には動きにくい。でも生体が使う物質と直接やり取りできるよ。



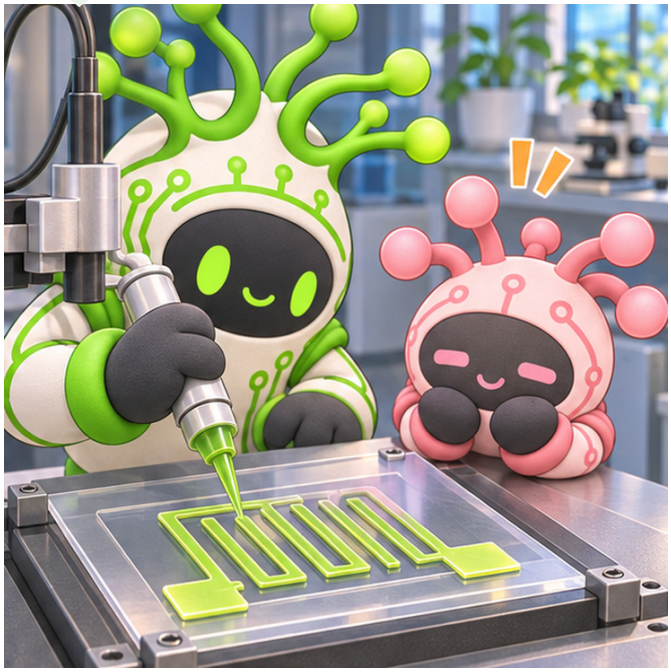
補足　電気泳動による薬物輸送と、溶液全体を運ぶ電気浸透流は異なる。デバイスごとに寄与を評価する。

測って、設計へ戻る

二種類のゲルを同じ形にして、一方だけに負の固定電荷を入れたよ。電圧を変えて、違いを測ろう。



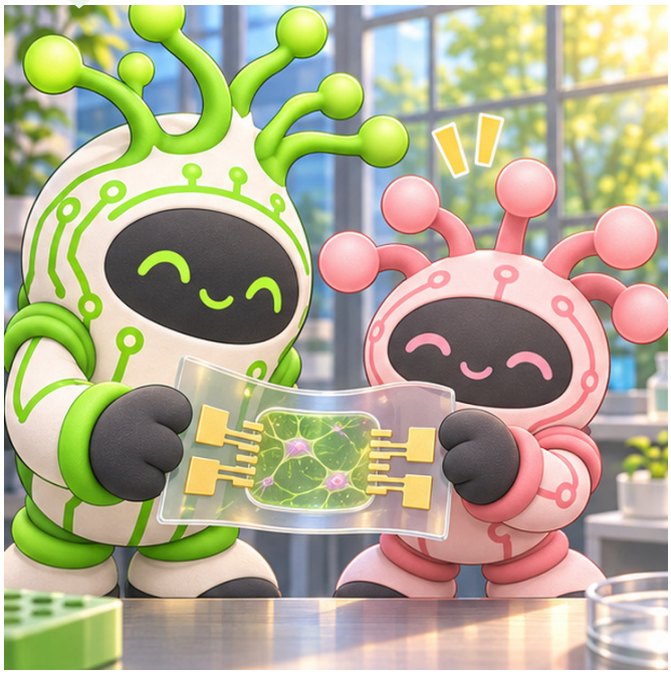
イオン電流、色素の移動、応答時間を比べよう。電極で起こる反応や温度変化も記録すると、原因を見分けやすいよ。



導電性高分子も複合すれば、電子とイオンの通り道を同じ材料の中につくれるんだね。次は細胞の信号を読む側もつなげたい。



そう。どの組成で、どんな微細構造を作れば、欲しい働きが出るだろう？　吉田研究室では、その問いを材料と加工の両方から試していくよ。

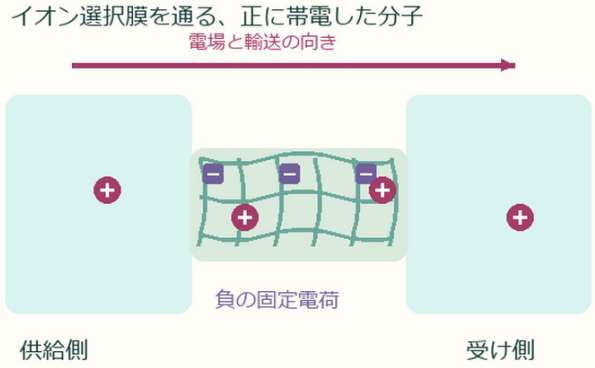


補足　単純なゲルが生体の情報処理全体を再現するわけではない。膜・チャネル・反応を組み合わせた研究課題として扱う。

自分のデバイスを考える

私なら、ゲルの一部だけに電荷を入れて、細胞のそばへ物質を届ける回路を試したい。

しくみ図 ／ 物質を届ける回路

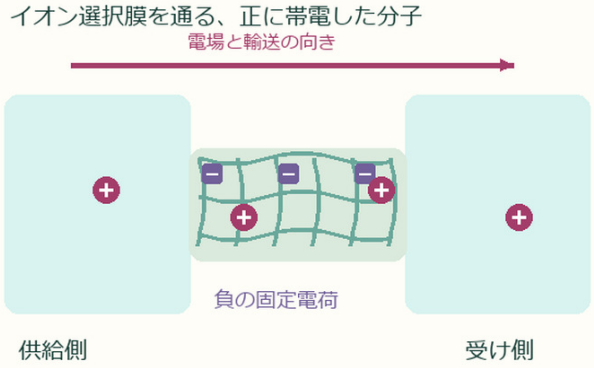


仮説：電荷をもつ分子を送る

有機材料・化学 ／ 01

それなら、届けたい物質の符号を確かめて、膜の固定電荷を選ぼう。まず細胞を入れずに、輸送量と漏れを測るんだ。

しくみ図 ／ 物質を届ける回路

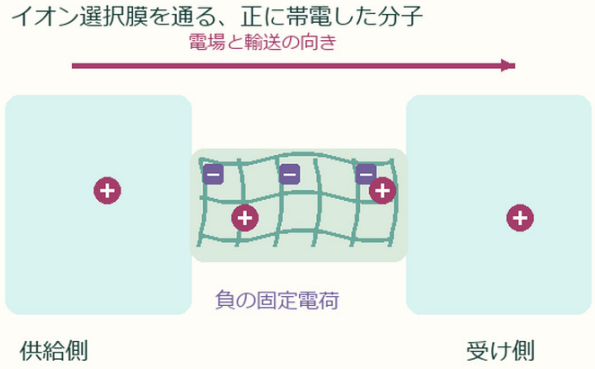


固定電荷を選び、漏れも測る

有機材料・化学 ／ 02

電子回路の速さと、イオン回路の物質を運ぶ力。二つを組み合わせると、測る側と届ける側を一緒に考えられるね。

しくみ図 ／ 物質を届ける回路

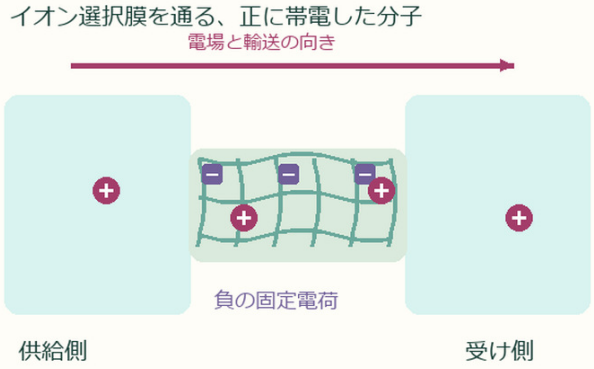


電子回路でイオン電流を制御

有機材料・化学 ／ 03

まだ最適な組成や構造は決まっていない。小さな仮説を立て、作って、測って、次の設計へ。その繰り返しが新しいデバイスにつながるよ。

しくみ図 ／ 物質を届ける回路



組成・構造・加工法を比較

有機材料・化学 ／ 04

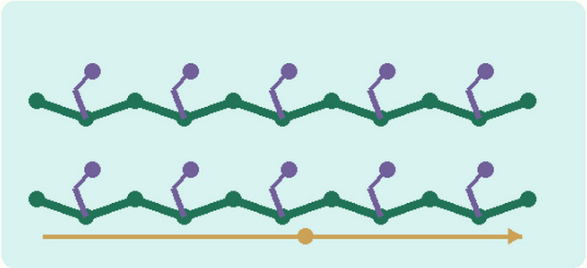
補足　細胞活動は膜電位やチャネルを通るイオンの流れなどに基づく。イオントロニクスでどこまで機能を再現できるかは研究課題。

数ナノメートルの違いを読む

同じ薄さの膜でも、イオンが入りやすい膜と、入りにくい膜ができるの？

しくみ図 / 分子の構造と水

高分子の局所構造を拡大



緑　主鎖　　紫　側鎖

局所の分子配置 → 膜全体の働き

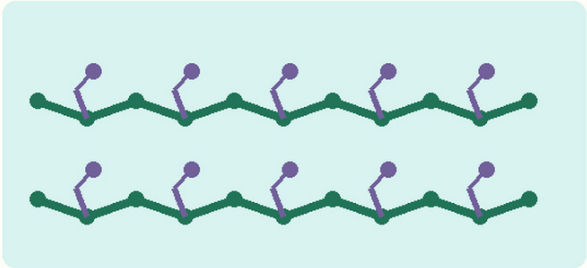
膜の向こうへイオンが入れる？

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

数ナノメートルの世界をのぞこう。高分子には長い主鎖と、そこから伸びる側鎖がある。側鎖の化学構造を変えられるんだ。

しくみ図 / 分子の構造と水

高分子の局所構造を拡大



緑　主鎖　　紫　側鎖

局所の分子配置 → 膜全体の働き

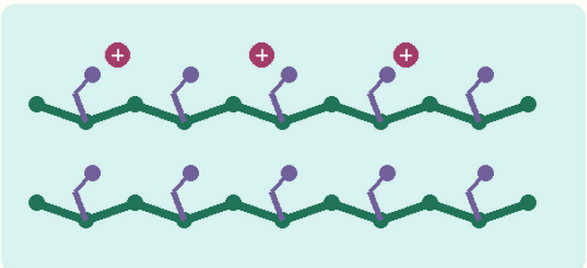
主鎖から枝分かれする側鎖

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

水となじむ側鎖にすると、水と一緒にイオンが膜の中へ入りやすくなるのね。

しくみ図 / 分子の構造と水

高分子の局所構造を拡大



緑　主鎖　　紫　側鎖

局所の分子配置 → 膜全体の働き

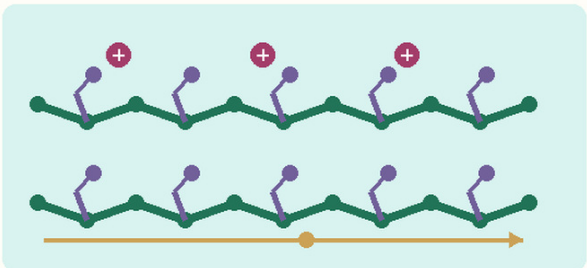
親水性の側鎖と水・イオン

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

そう。電子を運ぶには主鎖の並びや、隣の鎖との距離も大切だ。水の取り込みと電子の通り道を両方測って、分子を設計しよう。

しくみ図 / 分子の構造と水

高分子の局所構造を拡大



緑　主鎖　　紫　側鎖

局所の分子配置 → 膜全体の働き

鎖間の距離も電子輸送に効く

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

補足　高分子全体の長さはさまざま。ここでは、鎖どうしの間隔や側鎖の配置という局所的なナノ構造に着目する。

混ぜた液を、働く網目に変える

PEGDAの両端には、炭素の二重結合があるね。光重合開始剤と水を混ぜただけで、もうポリマーの網目ができるの？

光重合を分子で見る ・ 01 / 04

反応する場所はどこ？

PEGDA：中央のPEG鎖を、二つのアクリレート基で挟む

$CH_2=CH-C(=O)-O-PEG-O-C(=O)-CH=CH_2$

両端の C=C が反応点



二つの反応点が、架橋の鍵

水・PEGDA・光重合開始剤（LAP）を配合する。

ここではLAPという光重合開始剤を使うよ。光を吸収すると結合が切れ、不対電子をもつラジカルが二つ生まれる。赤い点がその電子だよ。

光重合を分子で見る ・ 02 / 04

光で開始剤が二つに分かれる

LAPの骨格（対イオンは Li^+）

$Mes-C(=O)-P(=O)(O^-)-Ph$

光を吸収



C–P 結合の開裂　→　二つのラジカル

赤い点は「不対電子」

Mes：2,4,6-トリメチルフェニル基　Ph：フェニル基

ラジカルがモノマーの二重結合に付くと、隣の炭素が新しいラジカルになる！　次の分子でも同じことが起きて、鎖が伸びるのね。

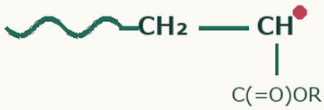
光重合を分子で見る ・ 03 / 04

二重結合が開き、鎖が伸びる

アクリレート末端の一つに注目（R はエステル側の残り）

$CH_2=CH-C(=O)OR$

成長末端が次のモノマーに付加



反応前 C=C　→　反応後 C–C

鎖の先のラジカルから、次の付加へ

鎖を伸ばす重合と、別の鎖をつなぐ架橋を区別しよう。

両端をもつPEGDAが別々の鎖につながると、鎖に橋がかかる。これが架橋だよ。橋が増えると、水を抱えるポリマーの網目ができる。

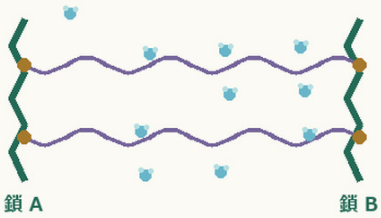
光重合を分子で見る ・ 04 / 04

二本の鎖に、橋がかかる

一つのPEGDAの両端が、それぞれ別の鎖に入る

成長鎖 A — PEG鎖 — 成長鎖 B

架橋する前　→　水を抱える網目へ



両端でつながると、鎖から網目へ

紫はPEGの橋。金色は両端が鎖に取り込まれる位置。

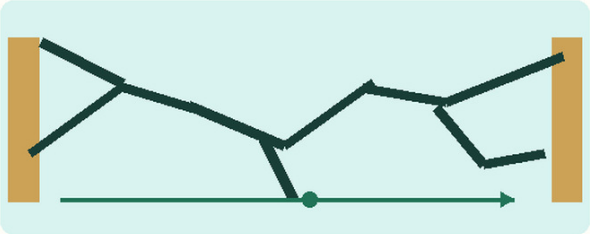
補足　PEGDAは両端にアクリレート基がある。中央は、すでに鎖になっているPEG。

炭素のつながりをひずみセンサに

グラフェンは薄いシート、カーボンナノチューブは細長い筒。柔らかい高分子に混ぜると、どこに電流が流れるの？

しくみ図 / 炭素の導電ネットワーク

柔らかい高分子の膜



金色　電極　　濃い線　ナノチューブ

変形 → 接触・間隔 → 抵抗

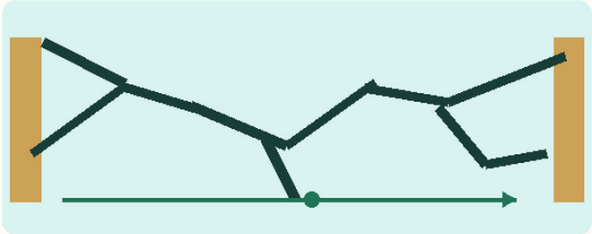
シート状と筒状の炭素

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

チューブが膜の中で接触したり、十分近づいたりすると、電極の間に電子が通る道ができる。塊が点在するだけではつながらない。

しくみ図 / 炭素の導電ネットワーク

柔らかい高分子の膜



金色　電極　　濃い線　ナノチューブ

変形 → 接触・間隔 → 抵抗

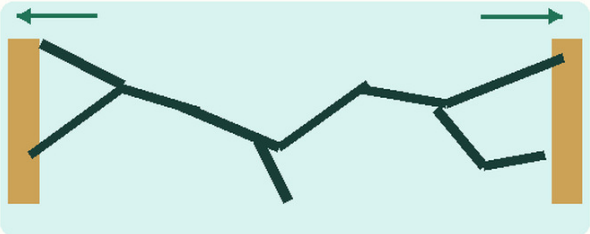
電極間をつなぐ接触

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

膜を伸ばすと、チューブの間隔や接触が変わる。抵抗が変われば、伸びを電気信号として読めるね。

しくみ図 / 炭素の導電ネットワーク

柔らかい高分子の膜



金色　電極　　濃い線　ナノチューブ

変形 → 接触・間隔 → 抵抗

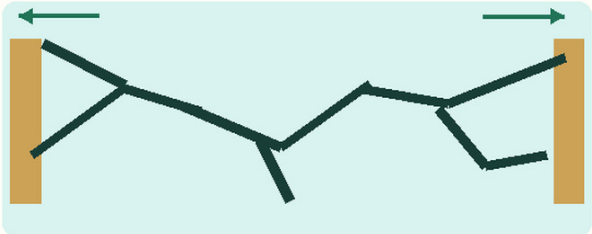
伸びで接触や間隔が変化

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

炭素の混合量と分散条件を変えて作り、同じ伸びで抵抗を比べよう。元に戻るか、何度曲げても測れるかもセンサの性能だ。

しくみ図 / 炭素の導電ネットワーク

柔らかい高分子の膜



金色　電極　　濃い線　ナノチューブ

変形 → 接触・間隔 → 抵抗

伸長と回復を繰り返し測る

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

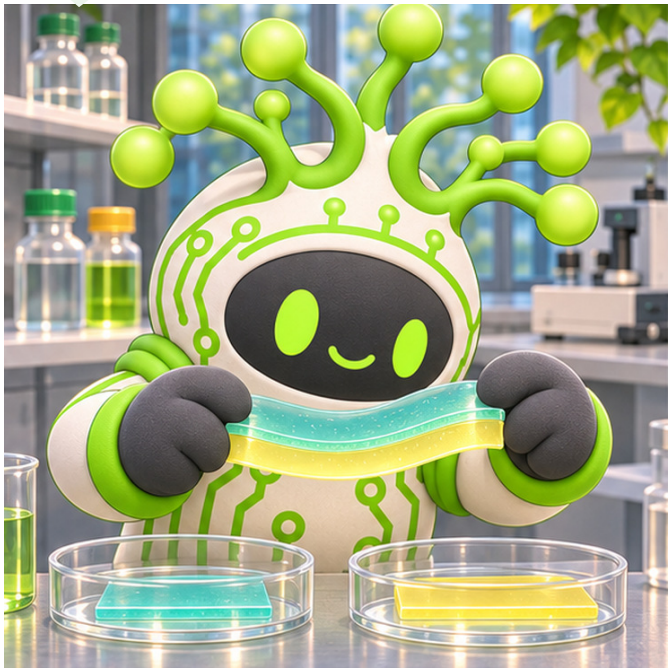
補足　導電経路は炭素材料の形、量、分散や接触で変化する。図の抵抗変化は一例。実際には繰り返し伸ばして戻り方も測る。

材料の収縮を、曲がる動きにする

ひずみセンサは、動きを電気で読む。逆に、材料が自分で動くアクチュエータはどう作るの？



温めると水を放出して縮む高分子ゲルと、同じ温度ではあまり縮まない層を貼り合わせよう。



片方だけ短くなりたいから、温かい水の中で帯が曲がった！　縮む層が弧の内側になるのね。



そう。分子の種類と架橋の条件、二層の厚さを変えると動きも変わる。温度を戻したときの形と、曲がる速さも比べよう。



補足　温度応答ゲルと受動層を接合した例。温度、含水率、層の厚さや架橋条件により、曲がり方は変わる。

ほしい機能から、合成を逆算する

有機トランジスタなら、ゲートで電流を変えたい。電子とイオンの両方が動ける高分子を選んで、電流の変化を測ろう。

しくみ図　/　機能から設計する

有機トランジスタ	側鎖・主鎖	電流変化
イオン選択膜	固定電荷	選択性
ひずみセンサ	炭素の接触	抵抗
アクチュエータ	二層の収縮差	曲率

電子とイオンを運ぶ膜

有機材料・化学　/　材料と界面の設計

イオントロニクスの膜なら、運びたいイオンから固定電荷の符号と量を決める。選択性と、反対符号のイオンの漏れも調べよう。

しくみ図　/　機能から設計する

有機トランジスタ	側鎖・主鎖	電流変化
イオン選択膜	固定電荷	選択性
ひずみセンサ	炭素の接触	抵抗
アクチュエータ	二層の収縮差	曲率

符号を選ぶ膜

有機材料・化学　/　材料と界面の設計

センサなら炭素の接触と抵抗、アクチュエータなら網目の収縮と曲がり方。同じ柔らかい材料でも、見る量が違うんだ。

しくみ図　/　機能から設計する

有機トランジスタ	側鎖・主鎖	電流変化
イオン選択膜	固定電荷	選択性
ひずみセンサ	炭素の接触	抵抗
アクチュエータ	二層の収縮差	曲率

入力・出力の異なる材料

有機材料・化学　/　材料と界面の設計

だから、分子構造を考え、原料を配合し、合成して測る。次はその材料を電極にして、水との境目で何が起きるか確かめよう。

しくみ図　/　機能から設計する

有機トランジスタ	側鎖・主鎖	電流変化
イオン選択膜	固定電荷	選択性
ひずみセンサ	炭素の接触	抵抗
アクチュエータ	二層の収縮差	曲率

設計に測定結果を戻す

有機材料・化学　/　材料と界面の設計

補足　四つの用途を比べる設計例。処方は一つに決まらない。組成・加工条件と測定条件を記録し、対照試料と比べる。

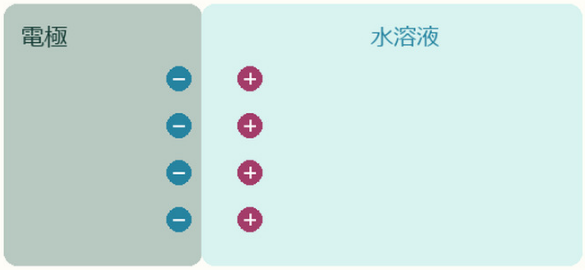
電荷をためる電極

電極の中は電子、塩を溶かした水の中はイオンが動く。二つが接する面で、まず何が起きるの？



例えば電極を負に帯電させると、水の側では表面近くに陽イオンが多くなる。向かい合う電荷の層を電気二重層と呼ぶよ。

しくみ図 / 電気二重層



電子は電極側にとどまる

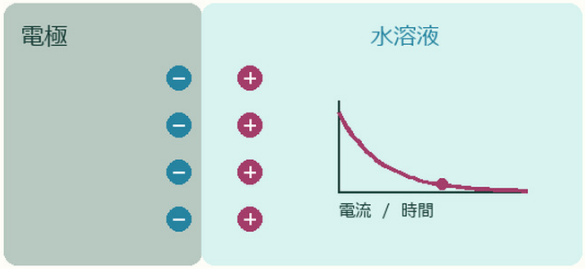
溶液側ではイオンが再配置される

負の電極と、溶液側の陽イオン

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

コンデンサみたい！　電圧を変えた直後は電流が流れて、電荷がたまると小さくなるんだね。

しくみ図 / 電気二重層



電子は電極側にとどまる

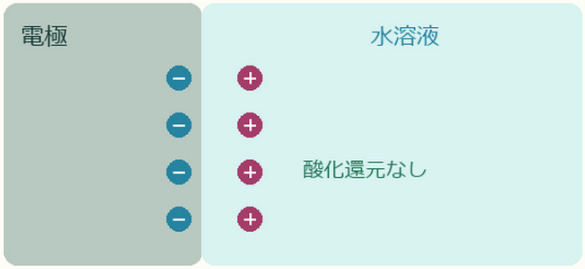
溶液側ではイオンが再配置される

充電時に流れる一時的な電流

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

この充放電が非ファラデー過程。電極と溶液の物質の間で電子を受け渡さずに、外の配線には充電電流が流れるんだ。

しくみ図 / 電気二重層



電子は電極側にとどまる

溶液側ではイオンが再配置される

電荷の分布が変わる

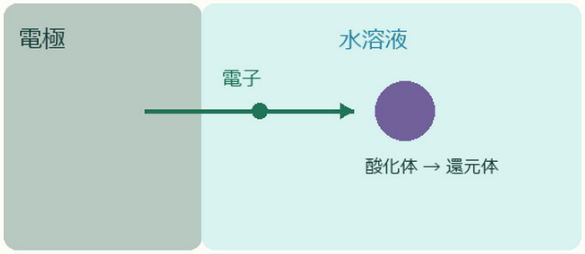
有機材料・化学 / 材料と界面の設計

補足　負に帯電した電極の例。溶液側では対イオンが多くなる。電極と溶液の間で酸化還元を伴わずに充放電する成分を示す。

電子を渡すと、化学種が変わる

今度は水に、電子を受け取れる分子があるよ。電極の電位を変えたらどうなる？

しくみ図 / 界面の電子移動



還元　Ox + e⁻ → Red

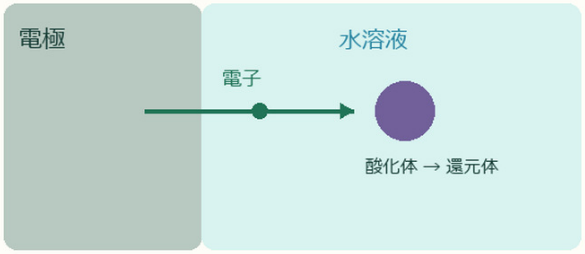
酸化　Red → Ox + e⁻

反応できる分子と電極

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

電極からその分子に電子が渡れば還元。逆に分子から電極へ電子を渡せば酸化。これがファラデー反応だ。

しくみ図 / 界面の電子移動



還元　Ox + e⁻ → Red

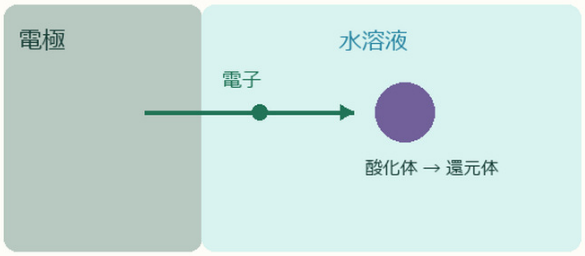
酸化　Red → Ox + e⁻

還元と酸化は逆向き

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

つまり、充電は電荷の並び方が変わる。酸化還元では、相手の化学状態まで変わるのね。

しくみ図 / 界面の電子移動



還元　Ox + e⁻ → Red

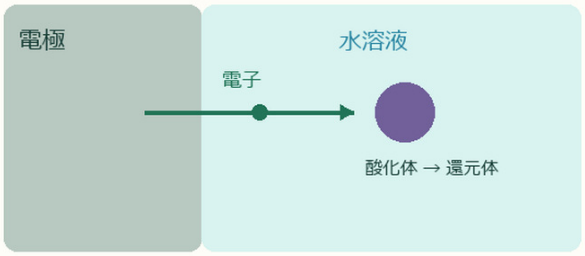
酸化　Red → Ox + e⁻

二重層の充電と酸化還元

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

同じ電極で両方が同時に起きることもある。電位や時間、反応する物質によって、測る電流の内訳が変わるんだ。

しくみ図 / 界面の電子移動



還元　Ox + e⁻ → Red

酸化　Red → Ox + e⁻

全電流 = 充電電流 + ファラデー電流

二つの電流成分の和を測る

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

補足　模式式 Ox + e⁻ ⇄ Red。Oxは酸化体、Redは還元体。水溶液中の物質や電極自身が酸化還元される場合がある。

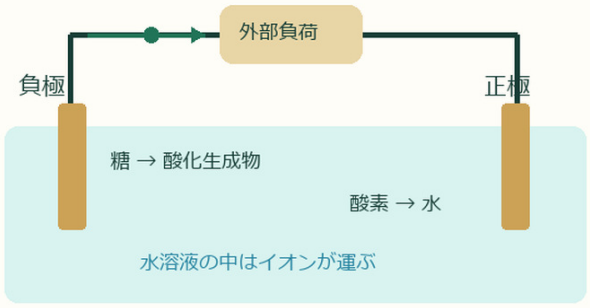
糖と酸素から電気を取り出す

バイオ燃料電池は、二重層にためた電気を取り出すの？　それとも、化学反応が続くの？



発電を支えるのはファラデー反応だ。負極では酵素がグルコースの酸化を助け、取り出した電子を電極に渡す。

しくみ図 / 酵素バイオ燃料電池



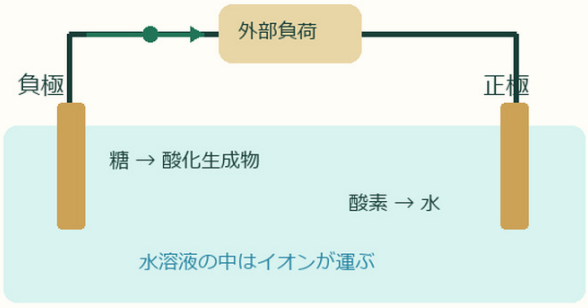
負極　グルコースの酸化
正極　酸素の還元

負極で糖が酸化される

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

電子は外の回路を通って正極へ。そこで酸素が電子を受け取り、水に還元されるんだね。

しくみ図 / 酵素バイオ燃料電池



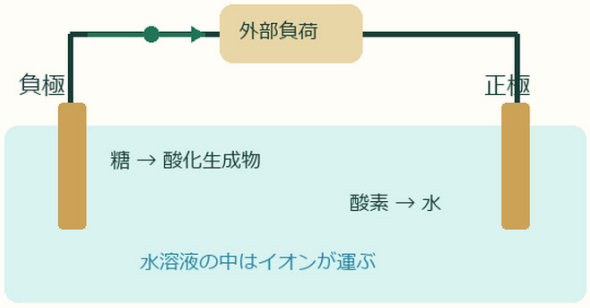
負極　グルコースの酸化
正極　酸素の還元

正極で酸素が水に還元される

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

そう。溶液ではイオンが動いて回路が閉じる。酵素を固定し、電子を渡しやすい炭素や高分子の電極を設計するんだ。

しくみ図 / 酵素バイオ燃料電池



負極　グルコースの酸化
正極　酸素の還元

外部は電子、溶液はイオン

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

補足　グルコース脱水素酵素と酸素を水まで還元する酵素を使う例。電子の移動を助ける媒介分子を用いる設計もある。

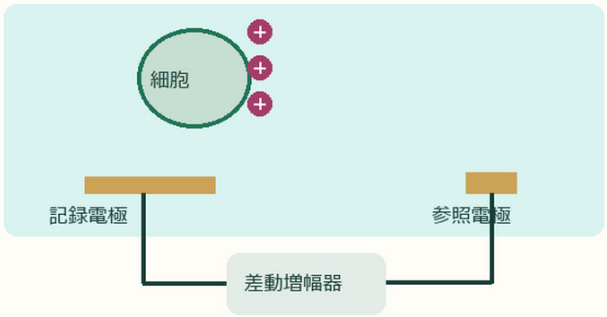
神経細胞の外の電位を記録する

細胞の外に置いた電極で、神経細胞の活動がどうして見えるの？



神経細胞の膜をイオンが出入りすると、周りの液に電流が流れ、場所によって電位が少し変わるんだ。

しくみ図　/　細胞外電位の計測



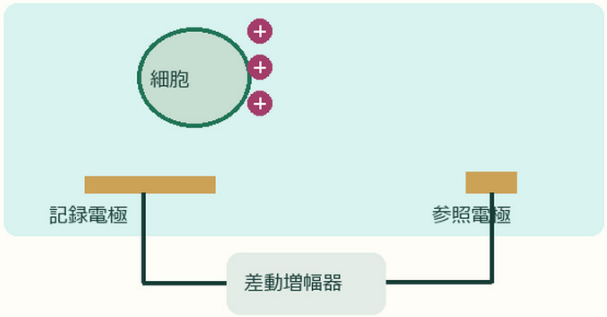
出力 ∝ 記録点の電位 − 参照点の電位

膜電流が細胞外の電位を変える

有機材料・化学　/　材料と界面の設計

近くの記録電極と参照電極の間の電位差を、高い入力インピーダンスの増幅器で読む。細胞の外で測る信号なのね。

しくみ図　/　細胞外電位の計測



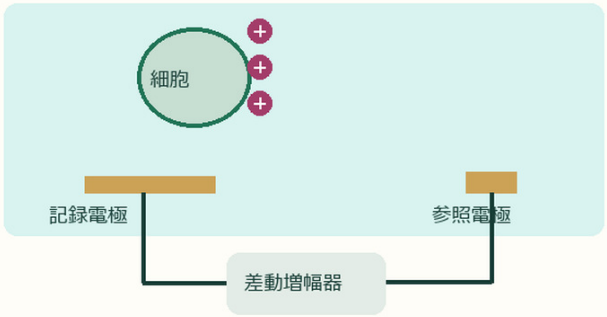
出力 ∝ 記録点の電位 − 参照点の電位

記録点と参照点の差を読む

有機材料・化学　/　材料と界面の設計

電極の界面にも容量や抵抗がある。欲しい周波数で波形や雑音を確かめよう。細胞の信号を読むために大きな反応電流を流す必要はないよ。

しくみ図　/　細胞外電位の計測



出力 ∝ 記録点の電位 − 参照点の電位

電極界面と増幅器の特性も影響

有機材料・化学　/　材料と界面の設計

補足　細胞外では近傍の電極と参照電極の電位差を測る。細胞内外の電位差である膜電位とは測定量が異なる。

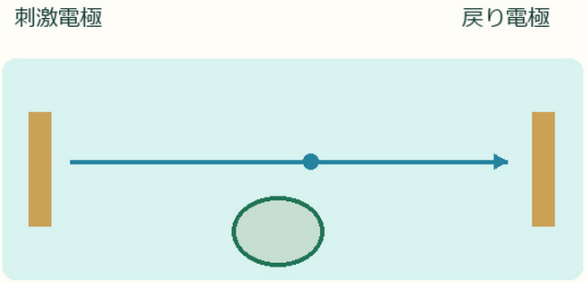
電気刺激で膜の電位を変える

記録の逆に、こちらから神経細胞へ働きかけるとき、刺激電極と戻り電極の間では何が動くの？



水溶液にイオン電流が流れ、細胞のまわりに電場ができる。膜電位が十分に変わると、活動電位が生じることがある。

しくみ図 / 電気刺激



細胞の外の電位差が膜電位に影響

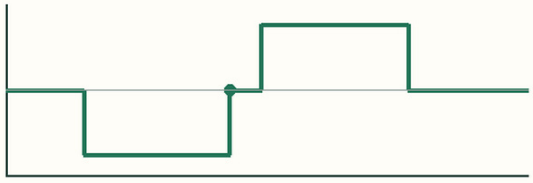
液の電場と膜電位

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

電極では二重層の充放電や、材料によっては可逆な酸化還元が電荷を渡す。向きの逆のパルスを組み合わせて、電荷を戻せるんだね。

しくみ図 / 電気刺激

刺激電流の時間変化



電荷量 = 電流を時間で積分した値

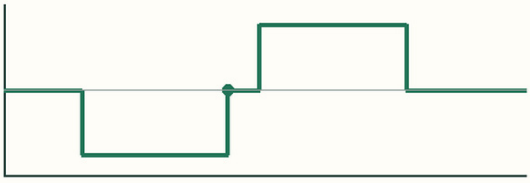
正負のパルスで電荷を戻す

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

ただし電位が行き過ぎると、水の電気分解や電極の劣化が起こりうる。電荷量と実際の電極電位を確かめて、材料と波形を一緒に考えよう。

しくみ図 / 電気刺激

刺激電流の時間変化



電荷量 = 電流を時間で積分した値

電位の限界は電極材料と溶液で変わる

電荷量と電極電位を確かめる

有機材料・化学 / 材料と界面の設計

補足　正負の電荷量はパルスの電流を時間で積分して比べる。電荷の釣り合いだけで副反応の抑制は保証されない。

用語をつなぐ

グラフェン・カーボンナノチューブ

炭素原子の平らな網と、筒状の網。炭素の同素体で、導電性高分子とは別の材料。

PEDOT:PSS

正孔を運ぶPEDOTと、固定負電荷を持つPSSの複合体。膜の導電性やイオン輸送は配合・加工条件で変わる。

OECT と OMIEC

有機電気化学トランジスタと、有機混合イオン電子伝導体。膜内のイオン移動を電流の変化として読み出す。

OFET と EGOFET

固体絶縁層を使う有機電界効果トランジスタ、および電解質ゲート型。後者では、理想的には界面の電気二重層が主役。

光硬化ゲル

GelMAは細胞が接着しやすく、未修飾のPEGDAは付着しにくい。PNIPAM系のゲルは温度によって膨潤・収縮する。

電気泳動 と 電気浸透流

電場による荷電粒子の移動と、電場が駆動する液体の流れ。両者の向きは固定電荷・溶液条件などに依存する。

イオントロニクス

イオンの移動や選択性を利用する回路・デバイス。物質を届ける機能や、生体と電気回路の接点を設計できる。

一次資料へのリンク

参考資料と研究例 I

研究室の研究内容

吉田研究室

微細加工と生体に接する電子デバイスの研究背景。

https://yoshidalab.r.chuo-u.ac.jp/research/

透明な有機マイクロ電極

Murakami & Yoshida, Mechanical Engineering Journal (2026)

印刷電極、20 μmの窓、ゲルと模擬信号による検証。

https://doi.org/10.1299/mej.26-00193

OECTの原理と生体信号の記録

Khodagholy et al., Nature Communications (2013)

陽イオンの注入、PEDOTの脱ドープ、電流変化による局所増幅。

https://doi.org/10.1038/ncomms2573

細胞と光造形ゲル

Nichol et al., Biomaterials (2010)

GelMAのパターニングと細胞接着。

https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20417964/

温度応答ゲルの加工

Hippler et al., Nature Communications (2019)

温度で膨潤・収縮する高分子の微細構造。

https://doi.org/10.1038/s41467-018-08175-w

荷電構造と電気浸透

Hill, Electric-field-enhanced transport in polyacrylamide hydrogel nano-composites

ゲル中の固定電荷と電場による液体輸送。

https://arxiv.org/abs/0707.2581

イオンで物質を届ける

Simon et al., Nature Materials (2009)

高分子膜中の電気泳動で神経伝達物質を送る実験。

https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19578335/

側鎖でトランジスタの動作を変える

Giovannitti et al., PNAS (2016)

側鎖と高分子の構造がイオン侵入とトランジスタ動作を左右する。

https://doi.org/10.1073/pnas.1608780113

参考資料と研究例 II

カーボンナノチューブのひずみセンサ

Yamada et al., Nature Nanotechnology (2011)

伸縮性基板上のナノチューブ膜で変形を検出した研究例。

https://doi.org/10.1038/nnano.2011.36

二層ゲルの曲がり方

Journal of Materials Chemistry B (2017)

温度応答性をもつ二層のゲルを使った曲げ動作。

https://doi.org/10.1039/C7TB00426E

グルコースと酸素のバイオ燃料電池

Electrochemistry 70, 940–942 (2002)

グルコース脱水素酵素負極とビリルビンオキシダーゼ正極の組み合わせ。

https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/70/12/70_940/_article

刺激電極の電荷注入

IEEE Transactions on Biomedical Engineering (2005)

イリジウム酸化物と白金イリジウム電極の電荷注入限界を比較。

https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16189975/

PEGゲルとタンパク質の吸着

Wang et al., J. Biomater. Sci. Polym. Ed. (2011)

未修飾のPEG系ゲルでも、条件によって一部のタンパク質は吸着する。

https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3855078/

温度によるPNIPAMゲルの収縮

Takata et al., Polymer (2002)

ゲルの平衡膨潤と収縮の速さを測定。

https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00089-7

LAPを使ったPEGDAの光重合

Fairbanks et al., Biomaterials (2009)

光開裂型開始剤によるPEGDAの重合とゲル化。

https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.08.055

制作　中央大学 吉田研究室 / 2026年11月

絵の制作に生成AIを使用。会話、図解、組版は教材用に構成。

動画・漫画の公開ページを開く