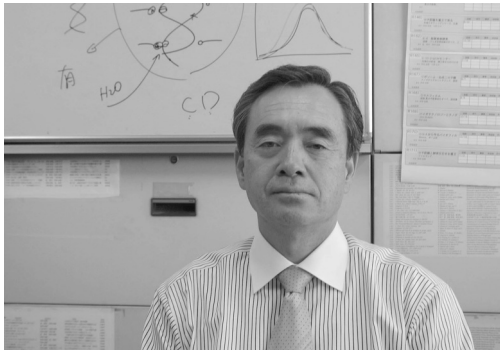




# 生体から生まれる新素材

## 岡畑・森 研究室 ~ 生体分子機能工学専攻



岡畑 恵雄 教授

全ての生物の細胞内に存在するDNA。生命をカタチづくる根本となっているこの物質は、およそ半世紀前にその実体が明らかになって以来、基礎的な研究と応用が盛んに進められている。

今回訪問した岡畑・森研究室は、このDNAに新たな可能性を与えようとする研究室である。DNAを高分子材料として選び、その特性を活かして新たな素材の開発ができないかと考えたのである。この発想から生まれたDNA脂質複合体とそのフィルム化について、岡畑先生にお話を伺うことにした。



## 材料としての視点から

DNAは「生体情報を記録する」という希有な特徴を持つ生体物質である。そのため、これまでは情報源としてのDNAが研究の焦点となってきた。実際に多くの生物の遺伝子解析が近年盛んに行われ、遺伝子治療やクローン技術などに応用されてきた。しかし、DNAはひとつの高分子として見た際にも、他の分子とは一線を画している。

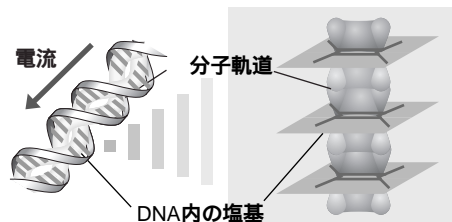
まずDNAが二重らせん構造である点が挙げられる。DNAは塩基、リン酸、糖が結合し、規則正しい右巻きの二重らせん構造を形成している。このような見事な分子構造は、最先端の技術であっても実現できない。さらにDNAは普通の高分子に比べて遥かに長い。ヒトでは一分子あたりの長さは1mにもなる。この構造から、DNAはよじった紐のような形をしているのである。

この特殊な形状のために、DNAには特筆すべき性質がある。分子の内部に電気が通るのだ(図1)。

結合では分子軌道が結合軸に対して垂直に形成され、電子はここを自在に動くことができる。DNAの二重らせん内部では塩基が縦方向に並んでいるが、これらはいずれも二重結合に特有の結合を多く含む。すると電子は一つの塩基に局在す

ることなく、塩基から塩基へと動く。これがDNAに電気が流れる仕組みである。他の高分子でも結合による導電性は得られるが、電流が分子の内部を一定方向に流れるという点で、DNAは大きな可能性を秘めているのである。

紐状で導電性があるという、さながら導線のようなこの性質を用いれば、DNAには今までになかった分子材料としての使い道が見えてくる。高分子工学科出身の岡畑先生はこの特性に着目し、DNAを導電体として利用できないかと考えた。



塩基が持つ二重結合が連なり、分子軌道が重なる部分を電子が移動できる。その結果、らせんの内部を電流が流れるようになる。

図1 DNAの電気伝導性



## DNA 脂質複合体の作製

特異な性質を持つDNAであるが、導電体として実用するには、応用しやすい形に加工する必要がある。そこで岡畑先生は最も汎用性のある形として、フィルムにしようと考えたのである。

フィルム化を行うにあたって最初に問題となったのはDNAの調達である。今までDNAは、主に分子生物学などの研究分野で使われてきた。ここではDNAを情報源として扱ってきたため、DNAが必要とされる量は $\mu\text{g}$ 単位と極めて少なかった。だが高分子材料としての利用を考えるならば、DNAは $\text{kg}$ 単位で必要となる。そこまでの量をどのようにして調達するのか。

この問題に関しては、日本の食文化から出る「ゴミ」を利用することで解決に至った。これまで先生が研究に用いていたDNAは牛の胸腺由来のものであったため、血液などの不純物が混ざってしまい、DNAを純粋な形で抽出するのが難しかった。これではフィルムを量産できず、実用化の上で問題があったのだ。

そこで、先生は鮭の白子に注目したのである。鮭の白子は毎年大量に採れるが使い道がなく、ほとんどが「産業廃棄物」として処分されてしまうため簡単に手に入る。またDNAの状態も、白子の内部ではタンパク質と結合しただけの単純な構造をしているため、抽出しやすいという利点がある。これにより、鮭の白子由来のDNAをフィルム材料として十分に得ることができた。

続いて問題となったのは、DNAが水溶性を示すことだった。先生はフィルムを作製する際に、材料を溶媒に溶かし、溶媒を蒸発させる手法をとろうとした。ここでDNAは水溶性であるので、溶媒には水を用いなければならない。だが水は沸点が高く、溶媒として使うと蒸発に多くのエネルギーを要する。これでは実用化に向かない。またフィルムにしたところで、空気中の水分を吸収して溶けてしまうだろう。

水溶性の問題を解決する際に、先生はDNAのリン酸部に着目した。DNA分子の最外部に存在するリン酸には通常、対カチオン(+)として $\text{Na}^+$ が結合している(図2)。これが水溶液中で電離するため、DNAは水溶性を示すのである。この

$\text{Na}^+$ を脂質高分子のイオンに置換することで、脂質高分子でDNAを包む形にする。脂質高分子は親油性なので、分子全体が親油性になって有機溶媒に溶けるのだ。これにより水溶性の問題は回避することができる。

ここで、フィルムを作製するためには、DNAに結合させる脂質高分子を選ばなければならない。脂質高分子の種類によって、完成したフィルムの硬度が変化するからだ。脂質高分子鎖が長いほど互いが絡み合うので、フィルムの硬度も高いものになるが、脂質高分子鎖を長くしすぎると、柔軟性が失われて板のようになってしまい、フィルムとして用いるのが難しくなる。適度な展性を得るために先生は様々な脂質高分子を試した。その結果、 $\text{C}_{10}-4\text{G}-\text{N}^+$ という脂質高分子を結合させてフィルムを作製することにした。

フィルム化を控えた最後の課題として、DNA脂質複合体が、本来の特性を維持しているかどうかを確認する必要があった。一定方向の導電性をフィルムに持たせるには、 $\text{Na}^+$ の脂質高分子への置換過程でDNA分子の二重らせん構造が変化してはならないのである。

先生は光の吸収スペクトルを利用して、本来のDNA特有の二重らせん構造が失われていないかを確かめることにした。DNA脂質複合体をクロロホルムなどの有機溶媒に溶かし、様々な波長の光を照射して偏光度を調べ、DNAの水溶液中での偏光度と比較したのである。すると実験の結果、DNA

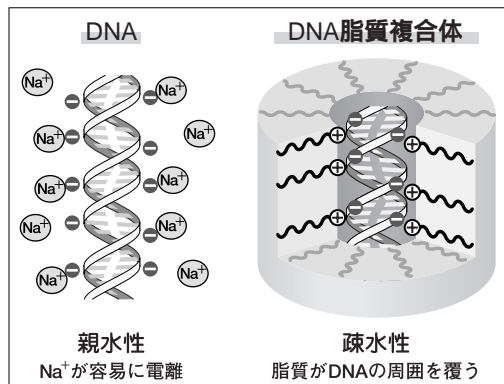


図2 水中でのDNAとDNA脂質複合体

脂質複合体が水溶液中と同様の偏光を示した(図3)。

またDNAは緩衝溶液中において、一定温度で塩基間の水素結合が切れて一本鎖になる性質をもつ。この性質はDNA脂質複合体にも当てはまったのだ。これより、DNAの構造は崩れていないことが明らかになった。

このことから、DNA脂質複合体はDNAと同じように、一定方向の導電性を持ちあわせていることが示されたのである。

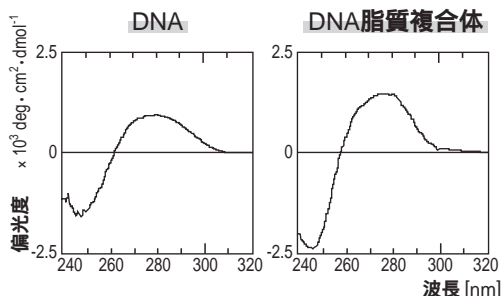


図3 吸収スペクトルの比較



## より優れたフィルムを目指して

このようにして、フィルム化に適したDNA脂質複合体を作ることができ、岡畑先生は溶媒にクロロホルムを用いてフィルムを作製した。さらにこのフィルムを水蒸気上で柔らかくして延伸することで、DNA脂質複合体分子の方向の一致を図り、フィルムに一定方向の導電性を持たせることができたのである(図4)。

DNA脂質複合体フィルムは完成に至った。しかし先生はこのフィルムをよりよいものになりたいと考えた。作製過程において、このフィルムには改善すべき点があったからだ。

DNA脂質複合体は分子量が大きい。溶媒を用いる当初の製法でフィルムを得ようとする、分子の密度が均一にならない。するとフィルムの膜厚が統一されず、延伸時に形が一定にならないのである。

そこで先生は、溶媒を用いることに囚われずに、フィルムの作製法を一新することにした。DNA脂質複合体を粉末にし、これをローラーによって加熱圧縮することでフィルムを作製するという「ホットプレス法」である(図5)。

ホットプレス法では、圧縮時にフィルムを延伸する。この製法により、加熱圧縮をする段階でDNA脂質複合体分子の方向を揃えることができる。ホットプレス法はフィルムの膜厚が一定になり、分子の方向一致が加熱圧縮時に行える点で、当初の作製法より優れているといえる。

先生は、溶媒を用いるところからフィルム化の着想を得た。しかし発想を転換することで、DNAの導電性を活かし、実用化に適したフィルムを作製することができたのである。

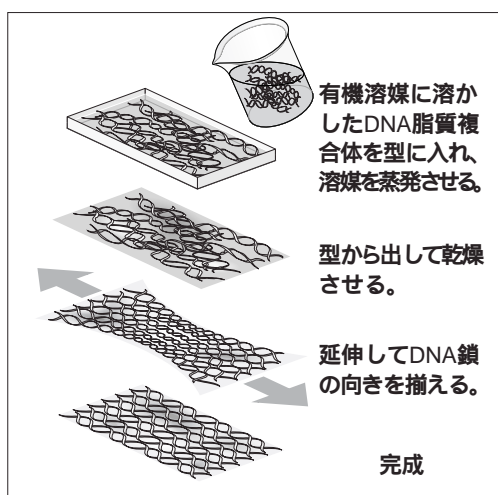


図4 DNA脂質複合体フィルムの製法

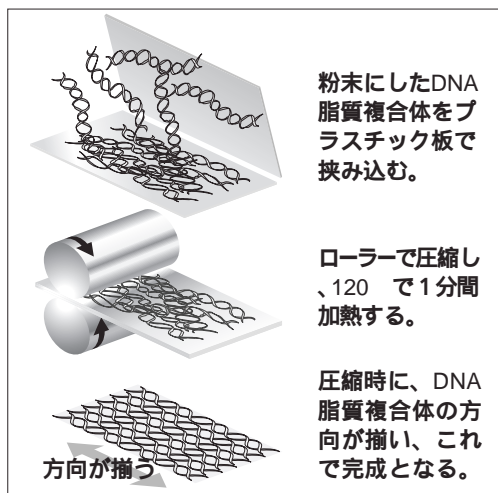


図5 ホットプレス法



## EL素子への応用

DNA脂質複合体フィルムは、従来考えられていた導電性に加えて、色素をインターカレート(挿入)する性質がある。それによって現在、EL素子への応用が考えられている。EL素子とは、強い電場を加えた時に光を生じる蛍光色素を含む素子のことだ。

従来のEL素子は、一般的に蛍光色素の発光層を負の電荷輸送層と正の電荷輸送層で挟み込む構造で作られている。これに電流を流すことで色素を光らせることができるのだ。そしてEL素子により、薄型平面カラーディスプレイなどが実現されてきたのである。

このEL素子として、色素をインターカレートするDNA脂質複合体フィルムを利用できる。通常の状態では、DNAは水が入らないようにきつく二重らせんを巻いていて、塩基対同士も密に接近している。だがDNAを色素溶液につけておくと、上下の塩基対間に色素がインターカレートしていく(図6)。先生はこの原理を用い、DNA脂質複合体フィルムに蛍光色素をインターカレートしたのだ。このフィルムは色素を含むと同時に導電性を持つ。つまり、電流を流すことでフィルムを光らせることができるので、電荷輸送層を貼り付けた多重構造にしなくとも、DNA脂質複合体フィルム一枚で色素が光る。これによりEL素子作製の時間を削減することができるのだ。

DNA脂質複合体フィルムは、色素の種類によって、あるいは同じ色素でもインターカレートする量によって、発光する色が変化する点が特徴である。この点でもDNA脂質複合体フィルムはEL素子の利用に好都合であると言える。

先生のこの発想は、もともと癌発生の仕組みから得たものであった。発癌性物質である色素体が原因となって癌が引き起こされるとき、DNAの色

素をインターカレートする性質が大きく作用しているのだ。

癌は細胞が異常増殖することによって引き起こされる病気であり、その異常増殖には細胞の突然変異が影響している。エチデウムプロミドなどの幾つかの発癌性の蛍光色素分子は、DNAの上下の塩基対間にインターカレートされる。この現象で化学修飾を受けたDNAは、塩基情報の読み取りの際に一本鎖になることができず、結果として細胞が異常をきたして癌化するのである。

ここで先生は、発癌性物質ではない色素をインターカレートすることで、EL素子を一枚にまとめることができないだろうかと考えたのだ。病気を引き起こす生命現象を逆手に取り、有用な素子として利用する。これはDNAが二重らせん形をした独特の生体高分子であるからこそ、できたことなのである。

DNAには導電性がある。その点に着目し、高分子材料として使おうという発想から始まったDNA脂質複合体フィルム。しかし結果として、生体高分子ゆえのDNAの多様な性質が、その用途を一層幅広いものになっているのである。

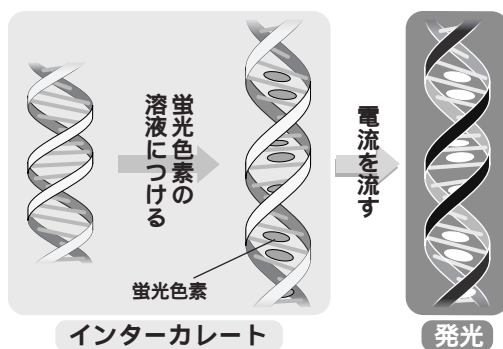


図6 色素のインターカレート過程

取材の際、先生はDNA脂質複合体について話して下さると同時に「事象を分子レベルから見ること」の素晴らしさについても語っていただきました。それにしても、DNAが高分子であるという実感もあまりなかった私にとって、DNAを材料

として活用する発想は非常に驚きでした。

最後になりましたが、お忙しい中二回の取材に快く応じてくださった岡畑先生に、心よりお礼を申し上げます。

(小泉 瞳)