

# NIMS NOW

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

No. 6  
2014

やわらかい  
材料  
ソフトマテリアル

# やわらかい材料

原子の数は114個<sup>\*</sup>。

その組み合わせである分子に至っては、無限大である。

無限にある物質・材料は、用途や目的に沿って  
人為的にいくつかの群にわけられている。

金属材料と呼ばれる材料群。有機材料、無機材料というわけ方。

構造物をつくる構造材料というジャンル。

機能を持ったものは機能性材料といわれ、光機能材料、導電性材料などがある。

そうした中で、物質のかたさに着目した

「やわらかい材料」「かたい材料」というわけ方がある。

今回特集するのは、その「やわらかい材料」だ。

やわらかければいいのか？ 結合状態はどうか？

どこまでやわらかいのか？ その作成方法はどうか？

その定義はあいまいなところも多い。

さまざまな物質が、ただ「やわらかい」というだけでカテゴライズされている。

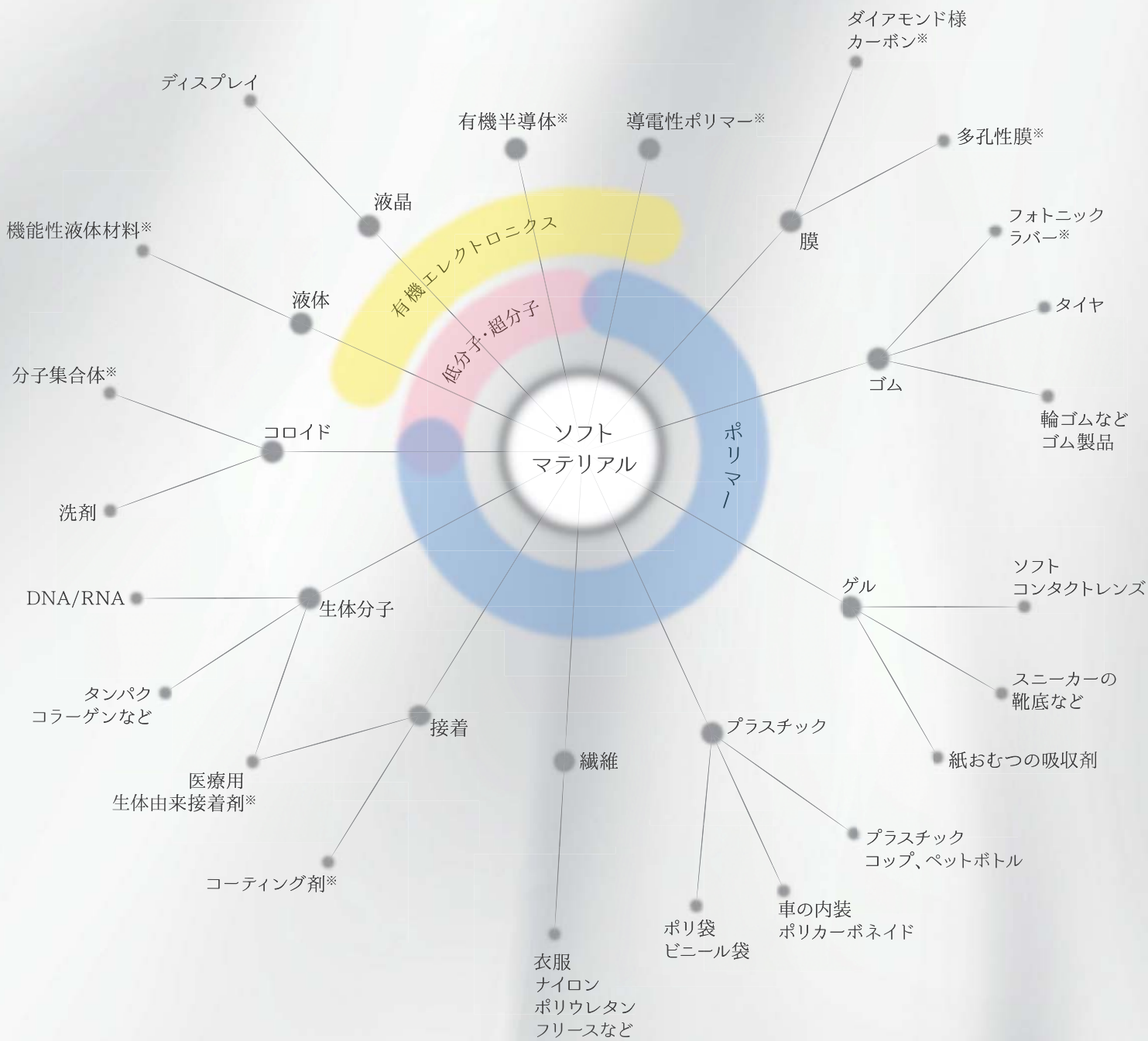
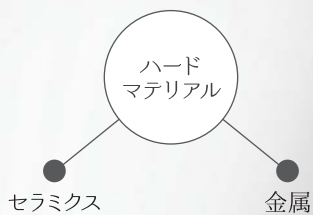
きっとそこには、「やわらかさ」の持つ重要な意味が潜んでいる。

やわらかいからこそ、意味のある材料。

その「やわらかい材料＝ソフトマテリアル」は、

いま注目が集まっている。

※2012年国際純正・応用化学連合(IUPAC)の命名決定による



※はNIMSの研究における代表的な例

# やわらかい材料 とはなにか？

やわらかい材料＝ソフトマテリアルはいままでどのような発達をしてきたのか。現在のソフトマテリアルの最前線、そしてNIMSにおけるソフトマテリアルの研究はいまどうなっているのか。NIMS先端的共通技術部門高分子材料ユニットのユニット長である一ノ瀬泉氏に話を伺った。

## ソフトマテリアルは多岐にわたる

ものをつくるための材料は、ある程度のかたさを持っている方が、“かたち”をつくりやすく、しかもそれを維持しやすい。ただ、そうはいつでもかたい材料だけでは困る点もある。身に着ける着物の材料などはやわらかさが大事だし、車輪をかたい材料で使えば乗り心地が悪くなる。

このような“やわらかい”材料である繊維やゴム。これらは、かつて自然（植物や動物の組織）の中に求められ、加工されて使われていた。

一方、社会が近代化され、産業が発展してくると同時に、ものの「軽さ」が重要視されるようになってきた。土や金属、木材といったかたい材料は、一般的に重い。橋などの構造材料では、その重さが有利に働くのだが、自動車、航空機、建築材、エレクトロニクス製品、精密機械などでは、軽いことの重要性が増してきた。

1900年以降、急速に科学的アプローチが進んだのが、有機合成を基本にした、人工のやわらかい材料、ソフトマテリアルだ。天然由来のやわらかな材料の分子構造や結合状態などが明らかになるとともに研究開発がすすんだ。今では人工のやわらかい材料は、かたい材料（金属、セラミックス）のカウンターパートとして主要な材料となっている。その代表選手は、プラスチックを中心として合成ゴム、合成繊維、液晶、ゲル、生体分子といったもので、やわらかい材料の需要はますます増える傾向にある。

## NIMSのソフトマテリアル開発

NIMSは2001年の設立当初から、やわらかい材料、特に高分子の材料研究に力を入れてきた。前身である金属材料技術研究所と、無機材研究所にはこのセクションはなかった。そのため、海外の研究所を参考に組織が作られ、特にマックスプランク研究所（ドイツ）を意識した研究体制を敷いた。NIMSにソフトマテリアルの研究者が参集して10年余り。現在いろいろな芽が出はじめている。

多孔性カーボンでできたろ過膜や、導電性のある有機物、新機能を持つ接着剤、スマートポリマー。このように新しく開発されるソフトマテリアル群だが、今後はその使われる環境が重要だとNIMSの一ノ瀬泉は語る。

「新しい材料の場合、新しい用途を探らなければなりません。たとえばなにかを表示させる材料の場合、機能的には光・電子機能を使うのですが、その利用環境が変わっていくと思います。特に、体に近いところ、ウェアラブルや生活環境での材料が必要なのではないのでしょうか。いま主流となりつつある4K以上のディスプレイに対抗するようなものを、新規の材料を使用して作ろうとしても、コストだけみても到底かないません。でも、インテリアや洋服などに従来では出ない深みのある色を出すことができれば価値が付きまます。このような質感を大事にし、かつウェ

アラブル、もしくは身近な生活に使えるような、個々人の嗜好にあうような有機材料を考えています。これらはヒューマンインターフェイスを重視したものになるでしょう」

## 未来のソフトマテリアルに必要なビジョン

さまざまな高分子の加工技術から、新しい用途、新しい機能材料を産み出している一方、より基礎的な、新しい分子構造をもつ高分子あるいはユニークな物性をもつ高分子集合体の研究も進められている。

新しい物性をデザインするには、分子構造に立ち返って考えるのが王道である。しかし、高分子の場合、それだけでは十分でない。高分子のような巨大分子では、分子の長さや折れ曲がりの程度、あるいは隣の分子との相対的な配置

が、材料物性に大きく影響するからである。エレクトロニクス分野や生体分野などへの応用につなげるには、高分子の挙動を様々な視点から解明しなければならない。

低分子の自己組織化で形成される高分子は、超分子ポリマーと呼ばれるが、2014年2月、NIMSはこの超分子ポリマーの長さを世界ではじめて制御することに成功した。自己組織化の制御は、材料設計のもっとも根本的で基礎的なものだ。超分子ポリマーから今すぐに新しい材料が出来るというわけではないが、この知見が今後の設計指針に必ず役に立つはずだ。

「NIMSは国の研究所ですから、信頼性を担保することは絶対必要です。それと同時に新しい知見につながる大きなビジョンを持つことが非常に重要なのです。このビジョンは借りてきたものでは使えません。自分たちで真剣に考えたビジョンを、材料にまで落としこめるようであれば大丈夫です。そのためには、深みのある基礎研究がその基盤になると私は思います」(一ノ瀬)

1991年のノーベル物理学賞を受賞したピエール=ジル・ド・ジェンヌによる受賞スピーチ「ソフトマター」から20年以上。ソフトマテリアルは新しい機能を持ち、私たちの生活を変えるかもしれない。



NIMS 先端的共通技術部門  
高分子材料ユニット ユニット長  
一ノ瀬 泉

# やわらかい材料の つくり方

TEXT:池田亜希子、編集部

## ポリマーの長さを コントロールする

ソフトマテリアルの代表選手は“ポリマー”だ。ポリマーとは、非常にたくさんの小さい分子(モノマー)が共有結合によってつながった、巨大なひも状の分子のことである。モノマーをつなげることを重合といい、モノマーの種類とその重合方法によって、ソフトマテリアルの性質は決まってくる。

一例を挙げると、天然ゴムをまねてつくられた合成ゴムのポリイソプレン( $(C_5H_8)_n$ )は、イソプレン( $C_5H_8$ )がn個連なって(重合されて)できている。

このひもの末端には、モノマーが重合できる「生長種」と呼ばれる部分がある。この生長種によって分類される重合の種類には、イオンを主に使うイオン重合(アニオン重合、カ

チオン重合)や、ラジカル<sup>※1</sup>を利用するラジカル重合などがある。ラジカル重合はモノマーの種類が多きなどから、現在では工業的にもっとも広く用いられている。

一般的には、この“ひも”=ポリマーは、さまざまな長さが混在している。その原因は重合の“開始”やその後の“生長”が揃わない、ラジカルの移動や停止反応などの副反応が起こる、などだ。これでは品質のコントロールが難しい。

この重合の開始と生長をコントロールし、副反応を抑え、より精密に重合させる(ポリマーの長さを揃える)ために開発されたのが、リビング重合である。

リビング重合は、1956年にアニオン重合ではじめて報告され(リビングアニオン重合)、その後、ほかの生長種へも拡張された。そして1995年、ラジカル重合にもリビ

ング重合が成功し、リビングラジカル重合が技術として確立され、高品質で高機能なポリマーの生成法として広くつかわれるようになった。安定しているアニオン、カチオンに比べて、反応性の高いフリーラジカルを利用するラジカル重合ではその制御が難しかったのだ。

このリビングラジカル重合の研究開発の功績が認められ、京都大学の澤本光男教授とカーネギーメロン大学のクリストフ・マチャシェフスキー教授は種々の賞を受け、2014年7月には、NIMS賞を受賞した。

## 長さの揃ったポリマーで 好きな形をつくる

NIMSの相見順子は、ブロックコポリマーを中心に研究している。ブロックコポリマー

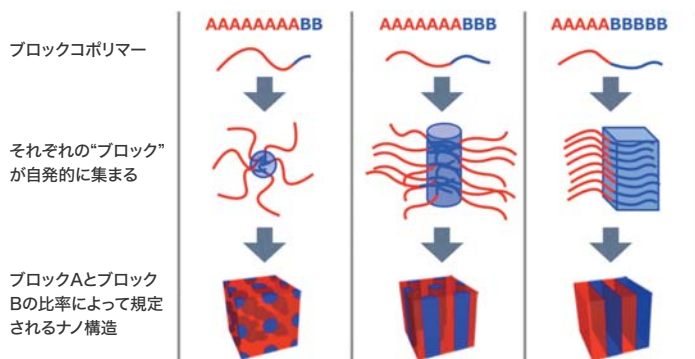


図1:さまざまなブロックコポリマー  
AブロックはAブロックどうして、BブロックはBブロックどうして集まるようとする性質がある。このようなブロックをつなぎあわせると、その長さによって、さまざまなナノ構造をつくる。

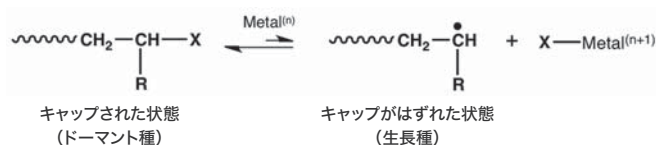


図2:リビングラジカル重合  
澤本光男教授とクリストフ・マチャシェフスキー教授が同時期に発表。両者の大きな違いは、澤本教授が金属触媒の金属にルテニウムや鉄などの遷移金属を使ったのに対して、マチャシェフスキー教授は銅を使った点だった。Xがキャップの役割をしている。



NIMS 先端的共通技術部門  
高分子材料ユニット  
有機材料グループ  
相見順子



NIMS 先端的共通技術部門  
高分子材料ユニット  
有機材料グループ  
杉安和憲

とは、図1のように2種類以上のモノマーからできており、それぞれのモノマーがポリマーの中でかたまり(ブロック)となっているものだ。ブロックコポリマーはリビング重合によって合成される。このとき、2種類のモノマーである、A分子とB分子がいくつ、どのようにつながるかによって、特徴的な構造が現れ、機能が発現する。

「A分子のブロックとB分子のブロックのサイズや配置を精密にコントロールすることで機能を発現させます。現在は、ポリマー材料の中に電荷の通り道をつくり、新しいエレクトロニクス材料を開発しています」(相見)。

ここでのリビングラジカル重合を詳しく見てみよう。相見は、「通常は、ポリマー末端の生長種がキャップされた状態になっていて、ときどきキャップがはずれた間だけポリマーが生長する(重合する)のです。」と話す(図2)。

一般の連鎖重合では末端は生長種と呼ばれるもので、ポリマーの生長はある意味なりゆきまかせだった。リビングラジカル重合では、ポリマーの末端を「ドーマント種」にしている。ドーマント種とは、それ自体は生長反応を起こさないが(キャップされた状態)、触媒などによって生長種へと変換

することができ(キャップがはずれた状態)、モノマー分子の連鎖重合が起こるようになる。反応中のほとんどの間はドーマント種として存在し(キャップされた状態)、生長種となる末端はごくわずかな量しか存在しないので、副反応がほとんど起こらない。これによってラジカル重合でもポリマーの長さが揃うようになった。

さらに、このドーマント種は繰り返し反応が可能で、Aの分子をリビングラジカル重合で任意のm個つなげたあと、引き続きBの分子を任意のn個連鎖させることができる。このようにして種々のブロックコポリマーを作ることができる。リビングラジカル重合にもさまざまな種類があり、さらに手法は進化している。

### リビング重合を 超分子ポリマーに応用する

一般的なポリマーでは、モノマーが共有結合により鎖状に連結されている。これに対して、「超分子ポリマー」というものがある。これは、モノマーが水素結合や配位結合など比較的弱い力によって自発的に集まる「自己組織化」という現象によってできる鎖状の

集合体で、美しく整ったナノ構造体をつくるものだ。光合成や神経系など、生体の重要な機能システムが自己組織化によってできていることから、超分子ポリマーは、材料科学やナノテクノロジー分野に新風を吹き込むと期待されている。

「超分子が面白いのは、分子どうしを結びつけている力が弱いために、くっついたり離れたりする可逆性があることです」とNIMSの杉安和憲は言う。しかし、この特徴は超分子の扱いにくさの原因でもある。

自己組織化は基本的に、分子が勝手に起こすことである。その上、簡単にくっついたり離れたりするるので、超分子ポリマーの生長をコントロールすることなど到底考えられなかった。

2014年2月、杉安らはNature Chemistryに論文を発表した<sup>\*2</sup>。それは、リビング重合を超分子に適用することが可能であり、超分子ポリマーの長さを精密に制御することができるという画期的なものだった。





## モノマーのデザインで自己組織化をコントロール

ポリマーを研究する相見が「モノマーにはごく一般的な、スチレンやメチルメタクリレートを使っています」と言うのに対して、超分子ポリマーを扱う杉安は、「モノマーそのもののデザインが重要です」と話す。自己組織化を起こす超分子の場合、どのような集合体になるかを決定するのは、ほぼモノマー分子の構造だからである。

図3 (a) は、杉安が新しく合成したポルフィリン分子であり、超分子ポリマー化するように設計してある。普通の自己組織化では、分子がモノマー状態から超分子ポリマー（組織された状態）になるのに、辿る経路はひとつである。モノマーは自発的に集合し、ポリマーとして鎖状になる。

しかしこのポルフィリン分子が超分子ポリマーとして組織化されるのに辿る経路が唯一ではない。

モノマーとして溶剤に分散されると、まず分子8-10個ずつがゆるい水素結合を介し、ナノサイズ(直径10nm程度)の会合体<sup>※3</sup>として粒子になる。これは、このモノマーが超分子ポリマーになるためにはある程度のエネルギーが必要なのだが、会合体になるにはほとんどエネルギーを必要としないためだ。そのため、モノマーはまず会合体としてとどまる。会合体はゆるく結合しているので、くっついたり離れたりしながら、溶液の中に漂う。

その会合体が分散的に存在している溶液中に、今度は超分子ポリマーの「タネ」を少量入れる。このタネは、同じポルフィリン分子で既に生長された超分子ポリマーを極短く分断したものだ。すると何が起こるか。

会合体がモノマーへとほどけながら、タネに誘導され、超分子ポリマーが生長するの

だ。しかも、このタネの誘導により、モノマーから直接超分子ポリマーになるエネルギーよりも少ないエネルギーで生長が進む。エネルギー準位としては会合体より超分子ポリマーのほうが低いため、最終的に、ポルフィリン分子は超分子ポリマーとなって安定する。(会合体では準安定の状態になる)(図3 (b))。

つまりこれは、今まで不可能とされてきた、超分子ポリマーの自己組織化の“開始”をコントロールできたということになる。この挙動を調べた結果、ポルフィリン分子の重合は、いわゆるリビング重合と同様のメカニズムが起こっていることがわかった。

さらに、粒子会合体と添加するタネの比率を変えることにより、最終的に生成される超分子ポリマーの長さも揃えられ、自在に制御できるようになった(図3 (c))。世界ではじめて、超分子ポリマーのコントロールに成功したのだ。

「リビング重合の学術的・産業的な重要性は、高分子化学の長い歴史の中で既に証明されています。今回の研究で、超分子ポリマーの可能性が大きく拓けたと思っています。今はこのポルフィリン分子でのみリビング重合が見られましたが、ほかにもこうした性質をもつ分子設計はないか探っています」と杉安は語る。

新しい分子設計により、新しい機能発現にも期待がかけられる。さらに新しい重合方法が次々と開発され、(超分子)ポリマーはいままで思いもつかなかった新しいソフトマテリアルをつくりだすだろう。

※1 ラジカル：不対電子をもつ分子種または原子。一般に不安定であり単離できるものは少ない。反応や分解の反応中間体として想定されることが多い。

※2 プレスリリース：<http://www.nims.go.jp/news/press/2014/01/p201402030.html>

※3 会合体：同種の分子2個以上が比較的弱い分子間力によって集合した状態。

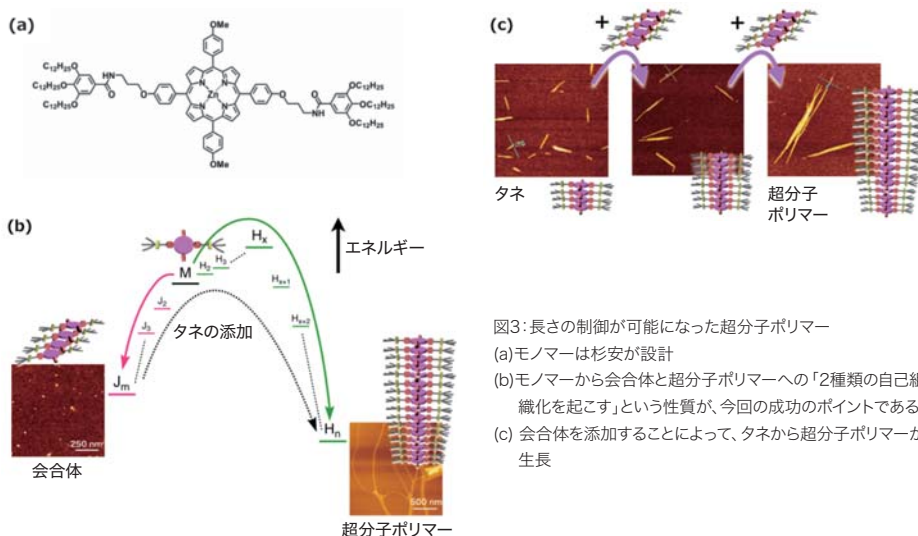


図3: 長さの制御が可能になった超分子ポリマー  
(a)モノマーは杉安が設計  
(b)モノマーから会合体と超分子ポリマーへの「2種類の自己組織化を起こす」という性質が、今回の成功のポイントである  
(c) 会合体を添加することによって、タネから超分子ポリマーが生長





# 私たちが研究したリビング重合

2014年度 NIMS 賞受賞者である、  
澤本光男教授とクリストフ・マテャシェフスキー教授からのコメントが届きました！  
リビング重合の開発にいたるきっかけ、今後の波及分野などについてお聞きました。

## —今回のNIMS賞受賞の研究内容の発見に至ったきっかけは？

リビングカチオン重合の開発や高分子精密合成が一段落し始めた1990年代初めから、ラジカル重合への関心が高まりました。私たちは、カチオン重合の制御で重要である炭素-ハロゲン結合が、イオンの・異極的(heterolytic;カチオン重合)のみならず、ラジカル的・等極的(homolytic;ラジカル重合)に解離することに最初から着目し、リビングラジカル重合を当初から念頭において、カチオン重合のルイス酸触

媒(求電子的・酸性)に代わる等極解離を誘発する何らかの触媒を探索していました。その結果、等極解離を進めるには、一電子酸化還元サイクルに関与する遷移金属錯体触媒に到達し、四塩化炭素・ルテニウム錯体開始剤系によるリビングラジカル重合が見出されたのです\*。

## —この重合法が貢献してきた、また今後貢献するであろう材料と分野について。

自然は多く縮合系高分子を用いて生体高分子(遺伝子, タンパク, 酵素など)を構築しています。なぜ連鎖系(炭素主鎖)の高分子が選択されなかったのか、

あるいは炭素鎖でも連鎖制御により新たな科学が創出されるのかなどへの回答に貢献できるのではと考えています。

貢献する材料として、現在検討中ないし実用化済みの材料として、高機能性シーラント, リチウム二次電池用高分子固体導電膜, 色素分散剤, フォトレジスト, 界面活性剤, 高機能接着剤, 分子認識・分離高分子材料(核機能化マイクロゲル型星型ポリマーなど)などがあげられます。

※1995年, Macromolecules この研究およびそれに先立つリビングカチオン重合の研究は、当時の講座担当の東村敏延先生(現・京都大学名誉教授)のもとで行ったもので、東村研究室のカチオン重合に関する長年の研究成果が基盤となっています。担当は当時の修士2回生で現・クラレの加藤充氏。また上垣外正己教授の貢献は大きく、とくにルテニウム錯体に着目したのは同教授の慧眼によるものです。



澤本 光男

京都大学工学部卒業後、京都大学大学院で博士号取得。公益社団法人高分子学会第29期会長。現在は京都大学教授。  
<http://living.polym.kyoto-u.ac.jp/sawamoto.html>

## —今回のNIMS賞受賞の研究内容の発見に至ったきっかけは？

様々なビニルモノマーや複素環式モノマーの精密重合/リビングイオン重合の開発を経て、ラジカル重合の制御という課題についても重要性を同程度まで認識するようになりました。すべてのポリマーの半数近くは典型的なラジカル重合により合成されているため、このような方法の発見は、非常に大きな影響力を持つと考えられました。私たちは、詳細な反応速度論的解析を用いてこの課題に取り組み、極めて選択的な反応である原子移動ラジカル付加(ATRA)に基づく触媒プロセスを採用することにし

ました。この手法をポリマー合成に適用して開発したのが原子移動ラジカル重合(ATRP)です。今では、ATRP法ではATRAの1/1000の触媒しか使いません。ATRP法は、水のような低環境負荷溶媒中で、還元剤として糖またはビタミンCを使い、極めて低濃度(数ppm)のCu系触媒でも行うことができます。

## —この重合法が貢献してきた、また今後貢献するであろう材料と分野について。

ATRP法は、精密に設計された複雑な構造のポリマーの合成に大変適しています。ATRP法により合成されたポリマーと無機物や天然物とを共有結合で

繋いだ材料により、新しい可能性がもたらされました。結果として得られたハイブリッド材料は、以前には得られなかった性質を備えており、高効率の分散剤や防汚剤、極めて低摩擦な表面材から薬剤、遺伝子導入法まで、幅広い応用が可能となります。ATRP法は様々なポリマーをタンパク質や核酸と繋ぐこともできます。自己修復性と形状記憶性を備えたインテリジェント材料や刺激応答材料の合成に利用することが可能です。



クリストフ・マテャシェフスキー

モスクワ工科大学卒業後、ポーランド科学アカデミー、フロリダ大学で博士号取得。現在はカーネギーメロン大学教授。  
<http://www.cmu.edu/maty/matyjaszewski/>

# やわらかい 材料を つかう

やわらかな材料が活躍する場はとても広範囲だ。  
ソフトでなければならないという基本条件はクリアしつつ、  
求められる機能をどのように材料にもたせるのか、研究者は日々考え続けている。  
ここでは最新研究成果を交えながら、  
使用環境を「電子機能」「生体」「光機能」「接着」「分離機能」の  
5つに分け、ソフトマテリアルの近未来を紹介する。

## 1 電子機能

### やわらかい材料だけで電子デバイスを作る

有機物は軽量で、安価、さらにフレキシビリティがある。そこで、有機物の特徴を生かしたこれまでにない電子デバイスの開発が進められている。しかし、通常有機物は電気を流さない。そこで、以前から、有機物に電気を流す方法が研究されてきた。これまで考えられてきた有機物に電気を流す方法は、無機半導体と同様に、ドーピングを行うというものだ。しかし、従来のドーピング方法には、化学的な安定性が損なわれるという課題があった。

それに対し、まったく新しいドーピング方法を発見したのが、NIMS小林由佳だ。彼女の方法を使えば、安定性の高い電子デバイスが、有機材料のみで作れ

るだけでなく、極めて低い電力で動作させられる可能性があるという。

「ポイントは塩橋ネットワークにあります」と小林。小林は、ある有機分子同士が塩橋ネットワークを形成すると、その中に水素イオンの欠陥が自然に発生し、この欠陥が、従来のドーピング剤と同じ働きを示すことを発見した(図1)。そして、この現象を利用すれば、極めて低い電力で電気を流せることが分かったのだ。

小林は、この有機分子を透明電極の材料として利用することで、大面積、低消費電力のフレキシブル・ディスプレイが実現できるのではないかと考えている。

また、フレキシブル・ディスプレイを実現するには、曲げても断線しない配線の

開発も不可欠だ。現在は、金属配線が使われているが、曲げ伸ばしを繰り返すと断線したり、はがれることが危惧される。そこで、NIMS川喜多仁は、金属に近い導電性を持ちながら、曲げ伸ばしに強い配線材料を開発した。

その材料とは、金属の微細な粒子で表面を覆った導電性ポリマー(図2)だ。この導電性ポリマーには、ポリピロールと呼ばれる有機物を、金属には銀を使用した。それにより、ポリピロール単体よりも2桁も高い導電率を達成した。

「曲げ伸ばしに強い理由は、ポリピロールの表面を覆う銀が、微粒子の凝集体になっているため、ポリピロールへの追従性が高いからです」と川喜多は説

明する。

この材料には、速く製造できるという利点もある。「現在は研究段階ですが、この技術を是非とも、次世代エレクトロニクスのカギを握る電極技術へと発展させたいです」と川喜多は意気込む。

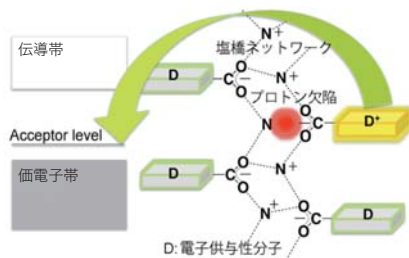


図1: 塩橋ネットワークが形成されると水素イオンの欠陥が生じる

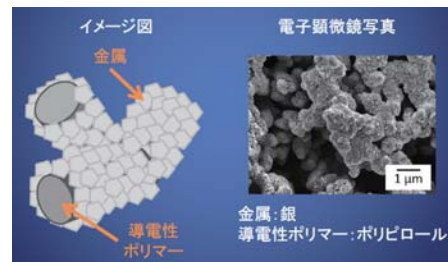


図2: 金属で覆われた導電性ポリマー

## マルチカラー電子ペーパーを実現する次世代材料

電子ペーパーは、新聞紙や本など印刷物の代替として期待されているが、現在はモノクロ表示しかできない。カラー化の研究は行われているが、本格的な実用化には至っていない。そこで、NIMS樋口昌芳が開発したのが、優れたエレクトロクロミック特性を示す「メタロ超分子ポリマー」だ(図3)。エレクトロクロミズムとは、電気を流すと、色が変わる現象のこと。メタロ超分子ポリマーは、有機物と金属イオンでできた高分子だ。電圧を数秒間かけて金属イオンの電荷を変えることにより、金属イオンから有機物への電荷移動が起こり、発色する。

再び電圧をかけない限り、色は変わらない。発色は、使う金属イオンの種類によって調整する。鉄を使えば青、銅を使えば緑、ルテニウムを使えば赤を発色できる。しかも、加える電圧によって、発色の度合いや色味を変えることができる。



図3: メタロ超分子ポリマーによる発色

樋口は、複数の金属イオン種を含むメタロ超分子ポリマーを用いて、薄型で、マルチカラーの電子ペーパーが実現できる可能性を示した。

「この材料を使って低環境負荷、省エネルギーに貢献していきたいですね」(樋口)。

小林由佳 先端の共通技術部門 高分子材料ユニット 有機材料グループ

川喜多仁 MANA-ナノマテリアル分野 ナノエレクトロニクス材料ユニット 半導体デバイス材料グループ

樋口昌芳 先端の共通技術部門 高分子材料ユニット 電子機能材料グループ グループリーダー

## 2 生体

体は柔らかい。  
だから、柔らかい素材がぴったりくる

これからの先進医療として、ますます注目されている再生医療。しかし、「意外にも、細胞がどのような環境を好んで組織をつくるのかといった未知のことも多く、世界中でホットな研究が行われています」とNIMSの川添直輝は言う。細胞から効率よく生体組織をつくるための、足場材料を手がけている(図4)。素材

は、天然由来の高分子コラーゲン。特徴は、細胞が入る孔が精密なパターンとして並んでいることだ。このような足場が今までなかったのは、軟らかいスポンジ様の素材に孔のパターンを加工するのが難しかったためだ。

冷やした銅板の上に、水滴で好きなパターンを描いて凍らせ、その上にコラー

ゲン溶液を注ぎ、凍結乾燥させる。簡単なようだが、コラーゲン溶液を注いだ時に、氷のパターンが融けないように、厳しい温度管理が求められる。「私たちは孔の大きさや並び方を制御したコラーゲンスポンジを作ることができました。この材料を使えば、細胞から組織ができるときに、孔の大きさや並び方の影響を調べる

ことが可能になります」と川添。また、血管細胞の成長を促す物質をパターン状に固定した足場材料をつくり、血管網を制御することにも成功した。再生医療を影で支える材料になりそうだ。

温度や光などの刺激に応答して、様々な機能を発揮する「スマートポリマー」。NIMSの荏原充宏は最近、磁気に応答するガン治療用シートを開発して注目されている。そんな荏原が、グランドチャレンジとして目指しているのが、ソフトマテリアルの長を存分に生かした人工臓器だ(図5)。「材料は、生分解性のスマート

ポリマーです。体の中で分解されてなくなるころには、ポリマーを足場にして、徐々に入り込んできた体細胞によって、新しい臓器ができています」。

そのためには、臓器の再生に合わせて足場の硬さを調整して、細胞に適した環境を提供しなくてはならない。ここでスマートポリマーの、外からの刺激に応答して様々な機能を発揮するという特性を利用するという。さらに、臓器に治療薬の投与が必要な場合には、あらかじめスマートポリマーに薬を仕掛けておき、必要な時に外から刺激を与え放出させることもできる。

荏原が目指す人工臓器の実現には、臓器なみに軟らかい生分解性ポリマーが必須など、まだ課題はあるが、要素技術は徐々に揃ってきており、夢物語ではなくなっている。

川添直輝 MANA-ナノライフ分野 生体組織再生材料ユニット 生体組織再生材料グループ  
荏原充宏 MANA-ナノライフ分野 生体機能材料ユニット 複合化生体材料グループ

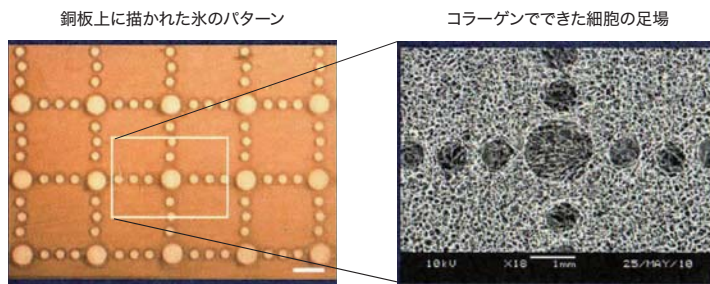


図4: 生体組織をつくる為の足場材料

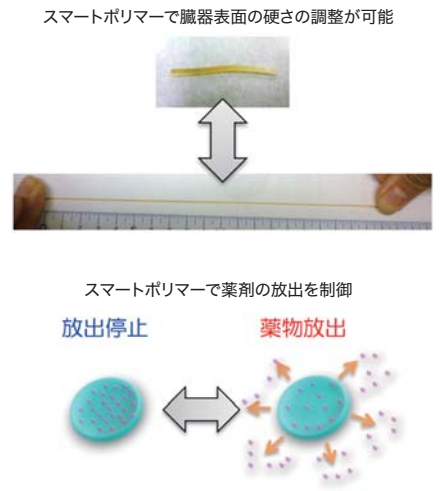


図5: 人工臓器に応用できるスマートポリマーの考え方

# 3 光機能

## 光を制御するソフトマテリアル

有機ELディスプレイなど発光する有機材料を使った光デバイスの開発が進められている。しかし、従来の有機材料は不安定で、耐久性が低かった。また、分子同士がすぐに凝集して、変色してしまうという欠点があった。そこで、これらの課題を解決するため、新たな有機材料を開発したのが、NIMS中西尚志だ。

完成したのは、発光する有機分子の周りに、枝分かれしたアルキル鎖と呼ばれる鎖状の有機分子を結合させた発光材料だ(図6)。中心となる発光分子には、オリゴフェニレンピニン(OPV)分子やアントラセン分子を採用。これらの分子

の周りに、アルキル鎖を結合させることで、発光分子同士が凝集しない。その結果、分子が本来持っている発光特性を、そのまま利用できるほか、光や熱に対する耐久性が格段に向上した。また、アルキル鎖を結合させたことで、材料そのものが液体化し、溶媒が不要となった(図6)。

OPV分子やアントラセン分子の液体は青色に発光する。これに、既存の蛍光体を混ぜるだけで、簡単に白色をはじめ、さまざまな色の発光液体を作成できる。「天井や壁に塗布すれば、自体が照明機器やディスプレイになるなど色々な応

用が考えられます。今後は企業と協力して1日も早い実用化を目指していきたいです」(中西)

光と色に着目した研究もある。オパール、タマムシ、カワセミ、…。これらに共通するのは、そのもの自体が色素を持っているわけではなく、表面の微細構造などにより、ある特定の波長の光だけが反射して見える「構造色」だ。

NIMS不動寺浩が開発したのは、変形によって色が変わる構造色材料の「フォトニックラバーシート」だ(図7)。薄い基板の上に直径約0.2ミクロンの微粒子の懸濁液を塗布すると、自己集積的に等間

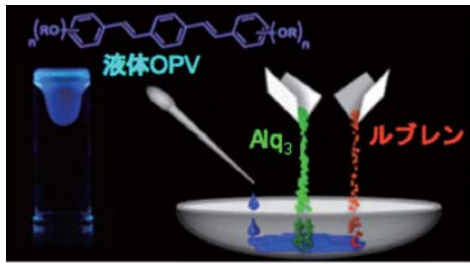


図6: 発光液体における発光色の調整方法

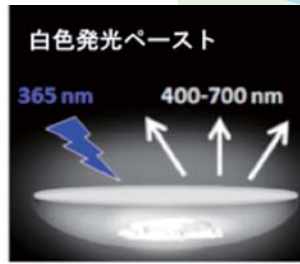


図7: フォトニックラバーシート

隔で規則正しく積層されていく。その微粒子同士の隙間をポリマーで固定する。これが特定の波長の光だけを反射する反射層となり、構造色を発現するのだ。この反射層の厚さは5ミクロン程度である。

反射する光の波長は、微粒子の間隔によって異なるため、基板をプラスチックや変形しやすいラバーシートなどの材料にすると、変形した部分だけ色に変化する。「たとえば、このシートを金属やコンクリートの表面に貼っておけば、変形し

た箇所が一目瞭然です」と不動寺。現在、実用化に向け、土木研究所と広島大学との共同研究が進行中だ。

中西尚志 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA) MANA独立研究者

不動寺浩 先端的共同技術部門 先端フォトニクス材料ユニット 応用フォトニクス材料グループ

# 4 接着

## 生き物をヒントにしたコーティング剤と生体に使う接着剤



図8: 今回開発したコーティング剤: 理論上は厚みを数10nmまで薄くできるため、接着剤や錆止めコーティングとして利用価値を高められる可能性を秘めている。

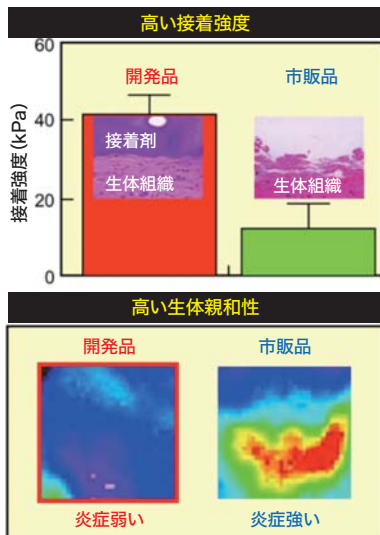


図9: 生体親和性が高く、接着強度も強い生体用接着剤

生き物はその体も、つくり出す物質も、ほとんどがソフトマテリアルできている。その一つからヒントを得て、何でもくっつくコーティング剤が生まれた。開発者であるNIMS内藤昌信は、かつて、ムラサキガイが嫌う物質を樹脂に組み込んで、ムラサキガイが船底に付着しない塗料をつくった(図8)。これに対して、本人が「これまでの逆転の発想ですよ」というように、今回のコーティング剤の開発では、ムラサキガイが船底に付着するメカニズムを真似た。

「私の研究はソフトマテリアルとハードマテリアルの橋渡しをするものだと思います。こう話す内藤がつくったコーティング剤には、どんなマテリアルにもくっついてしまうという特徴がある。その理由は、この接着剤には、金属や無機材料(ハードマテリアル)に結合する残基と、ソフトマテリアルと結合する残基の両方

があるからだ。何と何を貼り付けるかによって、接着剤としての応用範囲もかなり広がりそうだ。

接着剤といえば、医療現場では、傷口をふさぐために既に使われている。しかし、その性能は十分満足できるものではない。「求められているのは、接着強度が強くて、生体親和性(生体に馴染む度合い)が高いことです」とNIMS田口哲志。この要件を満たす、海洋生物由来のコラーゲンを主成分にした接着剤を開発した(図9)。コラーゲンに疎水基を導入したことで、細胞内に浸潤しやすくなり、接着強度と生体親和性の両立に成功した。

「医療現場で実際に使うためには、これだけではダメなんです。さらに、早く固まること、その際の反応が温和であること、治療に伴って生体に吸収されることといった特徴をもたせる工夫をした。中でも、融点が低い海洋生物のコラーゲン

を使用したことで、臨床医が使用前に温めて溶かす手間を減らせたこと、そしてポリエチレングリコール系架橋剤を加え

ると3分以内で固まることは、医療現場の迅速性への要求に応えた大きな成果だった。

内藤昌信 環境・エネルギー材料部門 環境再生材料ユニット 触媒機能材料グループ  
田口哲志 MANA-ナノライフ分野 生体機能材料ユニット 複合化生体材料グループ

# 5 分離機能

## 不純物を分離する膜材料

不純物を分離して、水を浄化する高分子材料の研究開発を行っているのが、NIMS一ノ瀬泉のグループだ。メンバーの藤井義久と佐光貞樹に話を聞いた。

彼らが開発に成功したのは、直径1ナノメートルの穴を持つ、厚さわずか35ナノメートルの分離膜だ。分離膜とは、ろ過フィルターのこと。「ダイヤモンド状カーボン」と呼ばれる高分子材料でできている。ダイヤモンドと黒鉛との中間に位置する材料だ。この膜に汚染水を通してろ過すると、1ナノメートルよりも大きな物質は通過できないため、真水を取り出すことができる(図10)。

穴の大きさを小さくすればするほど、不純物を高精度でろ過することができるが、その分、単位時間あたりの処理量は減ってしまう。分離膜を開発する上では、汚染水を、処理速度を下げることなくろ過することが課題だった。それに最適な材料が、薄くて、丈夫なダイヤモンド状カーボンだったのだ。

「分離膜が薄ければ薄いほど、膜を通過する液体の速度は上がります。ダイヤモンド状カーボン膜は薄くても丈夫な上、従来のプラスチック製の分離膜とは異なり、石油や化学薬品、高温に強いという特徴を持っています。そのため、原油を取り出す際に大量に発生する随伴水の処理にも有用だと考えました」と藤井は語る。

また、ダイヤモンド状カーボン膜と並行して開発を進めているのが「高分子多孔体」(図11)。これは、直径10ナノメ

ルの穴が無数に開いたプラスチックだ。多孔体中の空間の割合は約50%で、極めて高い比表面積を持つ。この中に、石油精製工場などで排出される廃水を通すと、プラスチックがオイルを吸着するので、ろ過フィルターとして使える。ダイヤモンド状カーボン膜を使ったらろ過の前処理に使えば、効率が上がる。

「課題はプラスチックにいかに10ナノメートルの微細な穴を無数に施すかでした」と佐光は語る。そこで「相分離法」と呼ばれる技術を駆使することにした。具体的には、ジメチルホルムアミドという溶媒の中に、プラスチック材料を溶かし、急速に冷却した。溶媒をどれくらいの時間をかけて、何°Cまで冷却するかが、穴の大

きを調整する上でのポイントとなった。

佐光は、この材料がソフトマテリアルであることの利点は、「再利用可能なこと」だという。廃水中のオイルは、室温でプラスチック中に吸着させるが、80°Cくらいまで温めると材料が柔らかくなり、中から溶け出し始める。それを除去することで、繰り返し使用できる。

「分離膜の市場ニーズは一層、高まっていくと予想されます。今後も、ソフトマテリアルの利点を生かした分離膜を開発していきます」と佐光は語る。

藤井義久 先端的共同技術部門 高分子材料ユニット 分離機能材料グループ  
佐光貞樹 先端的共同技術部門 高分子材料ユニット 分離機能材料グループ

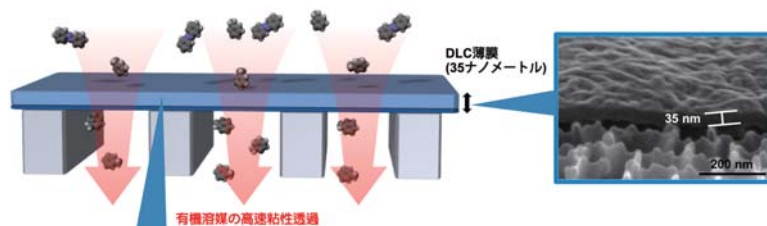


図10:ダイヤモンド状カーボン膜を使ったらろ過の模式図

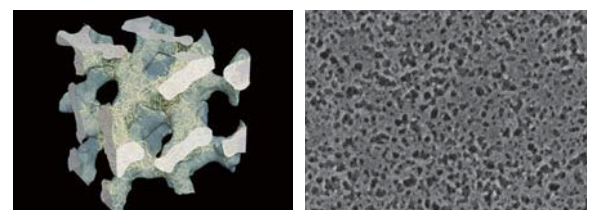
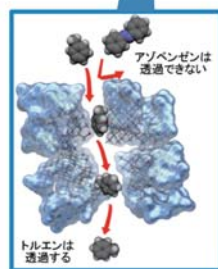


図11:高分子ナノ多孔体の模式図

ポリスチレンから作製した高分子多孔体の断面の走査電子顕微鏡像

先日、上野で開かれていた故宮博物院の宝物展を見に行きました。中国の何千年にもわたる文化を垣間見ることのできるすばらしい展示でした。陶磁器や絵画、掛軸などと並んで、意外に多かったのが“書”でした。紙の上に文字を記すということは、人類が生み出した数多くの文化の中でも、特筆すべきものでしょう。

古来、人びとは、洞くつの壁などに絵を描くことによって、さまざまな考えや身の回りのできごとを周囲の人たちに伝えようとし、やがてそうした絵を記号化することによって文字というものをつくり出しました。

文字の文化は、紙の使用によって絶頂期を迎えました。グーテンベルクの印刷術の発明によって、紙に印刷された文字が、もっともポピュラーな情報伝達の手段になりました。紙に印刷された文字＝本は同じものを大量に作るできるようになり、物流の発達もあって情報を伝達・媒介する技術(メディア)がより広く形成されていきます。

1946年には世界初のコンピュータがつくられ、その後の通信技術の進歩も加

わって、あっという間に新しい情報処理通信技術が、私たちの生活を変えました。膨大な情報を一瞬のうちに世界中に配信することができ、その情報を、記憶装置の中に保存しておき、いつでも簡単に検索することができる……。それだけではありません。情報処理通信技術の進歩は、紙でない紙をも生み出そうとしているのです。

紙でない紙、電子ペーパーは、その名のとおり、紙のように使い、軽くて持ち運びできる、非常に薄い表示装置のことで、太陽光など、外部からくる光を反射させて画面を表示するため、バックライトをうしろからあてる液晶ディスプレイよりも、日光のもとなどでは見やすくなります。また、画面の内容を変化させるときにだけ電力を消費するため、電力消費も非常に小さく、一度充電すればきわめて長い時間、機能を維持することができます。このように、液晶よりもより紙に近い表示装置として、たいへんすぐれた特性を持っているのです。

市販の電子ペーパーの代表的な動作原理としては、電気泳動を利用したマイ

クロカプセル方式があります。電子ペーパーのなかにはマイクロカプセルが封じ込められていて、そのなかに電荷をもった黒い粒子と白い粒子が入っています。電圧をかけるとプラス側の電極にはマイナスの電荷をもつ黒い粒子が近づき、マイナス側電極にはプラスの電荷をおびた白い粒子が引き寄せられます。電極上でプラスとマイナスを制御すれば、白黒の文字の表示ができるというわけです。この方式ですと白黒表示しかできませんが、現在さまざまな動作原理によるカラー化がすすめられています。たとえばNIMSではメタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミック法などが研究・開発されています。エレクトロクロミックとは、電圧印加により可逆的な電気化学的酸化還元反応により物質の色が変化するもので、さまざまな材料が試されています。

実用化された白黒の電子ペーパーは、硬いケースに覆われたものが主流ですが、近い将来にはフルカラーで、本当の紙のように薄くて丸めることもできるようになるでしょう。デジタルサイネージ\*も今は液晶が主流ですが、消費電力は多大なものです。これらもいずれは消費電力が小さな電子ペーパーになっていくかもしれません。

洞くつの壁に描かれた絵や数世紀前の中国の書から現在まで、読むという行為に深くかかわる伝達手法が、紙になり電子ペーパーになり、変化し続けているのです。紙の上に記された文字も、役割が変化していくのかもしれない。

私自身は、紙に手書きの文字で書く文化の存続を願っているのですが。

えとりあきお：1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ(現テレビ朝日)、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わったのち、『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。

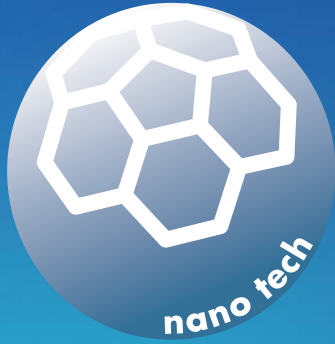
## 電子ペーパー 紙ではない紙

文:えとりあきお

題字・イラスト:ヨシタケシンスケ



\*デジタルサイネージ: 駅などの大きなポスターに替わる多機能ディスプレイ



International Nanotechnology  
Exhibition & Conference

# nano tech 2015

第14回 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議

NIMS  
NOW

No.6  
2014

2015

1/28(水)~1/30(金)

東京ビッグサイト東4・5・6ホール&会議棟  
NIMSブース:東5ホール ブース番号5R-01

NIMSは今年も充実の内容で出展いたします。  
ポスター 20点以上、講演も多数開催いたします。  
鉄鋼材料から、エネルギー材料、ナノエレクトロニクスまで。  
皆様のお越しをお待ちしています。

<http://www.nanotechexpo.jp/>



NIMS NOW vol.14 No.6 通巻149号 平成26年11月発行  
独立行政法人 物質・材料研究機構

R100

古紙配合率100%再生紙を  
使用しています



植物油インキを  
使用し印刷しています

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1 TEL 029-859-2026 FAX 029-859-2017 E-mail inquiry@nims.go.jp Web www.nims.go.jp

定期購読のお申し込みは、上記FAX、またはE-mailにて承っております。 禁無断転載 © 2014 All rights reserved by the National Institute for Materials Science

撮影:石川典人 デザイン:lala Salon Associates株式会社