

高知大学農学部
市浦英明准教授



1974年福岡県生まれ。九州大学農学部卒業、同大学院博士課程修了(森林資源科学専攻)。農学博士。98年から酸化チタン・ゼオライトシートによる大気環境浄化を研究。2003年、愛媛県紙産業研究センターへ入所し、高度センシング機能を有するインテリジェント機能紙開発を研究。06年10月から現職

「自ら環境を検知し、自然に文字を消す」 知能をもつ「インテリジェント機能紙」

「第5世代の材料」ともいわれるインテリジェント材料は、周囲の環境条件や外部刺激によって自ら材料特性を変化させる。この特性に着目し、温度や湿度に反応し、一定時間経過後に文字を消す仕組みを備えた機能紙の研究が進んでいる。セキュリティ情報の可視化・不可視化をはじめ、農業シートなどへの用途開発が展望されている。

情報セキュリティ対策に 強力な助っ人登場も間近!?

「この書類の文字は、一カ月後に自動的に消滅する……」

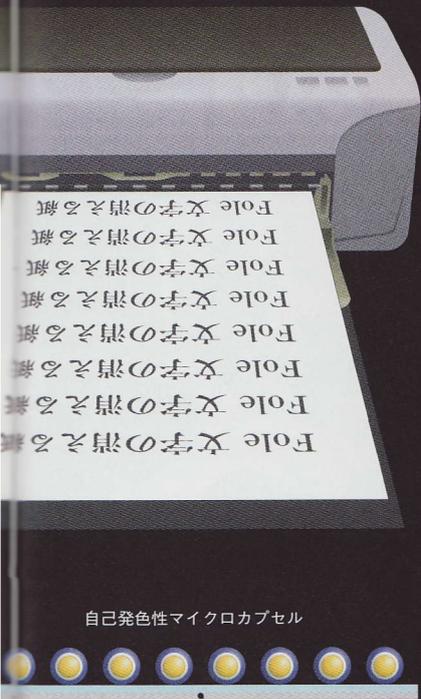
そんなスパイ映画のような奇抜な仕掛けが、現実になろうとしている。高知大学農学部の市浦英明准教授が開発する「考える紙」インテリジェント機能紙」のなせる技だ。デジタル情報をプログラムで処理するのではなく、あくまでも物理的な紙の上で起きる現象である。例えば、重要書類が倉庫にストックされてい

る状態のまま、何も操作を行わずとも、保管期限がくるとあつという間に文字が消えてしまう。

情報セキュリティ対策は、今や重要な経営課題のひとつ。オフィスには関係者以外の目に触れては困る社外秘の文書、個人情報記載された顧客リストなどの重要書類があふれている。保管期限が過ぎたら処分するのが普通だが、機密を保持しながら廃棄する方法がなかなか難しい。社内でペーパーシュレッダーにかけて裁断するには手間も時間もかかる。そのうえシュレッダー屑は、

感熱紙や印画紙などと同様に、リサイクルに適さない禁忌品の扱い。焼却されるのが一般的で、環境問題に逆行してしまう。かといって、そのまま再生ゴミとして出せば情報漏洩リスクが伴う。最近では、禁忌品もまとめて封印した段ボールで回収して溶解処理をする業者なども増えているが、目の届かない中間ルートで情報が流出する危険は完全には排除できない。

そこで、外部に出す前に情報のみを消し去り、紙はリサイクル可能な資源ゴミとして出すのが理想的な廃



自己発色性マイクロカプセル

タンニン酸紙

あらかじめタンニン酸を塗布した紙に、硫酸鉄を芯材にした球状の薄膜であるマイクロカプセルを定着させておく。インクの種類などは問わず、一般的なプリンターで印刷可能。現在、球形の大きさは直径1mm程度。さらなる小型化を進める

カプセルの表面を覆った吸湿性液体(グリセリン)が空気中の湿気を吸収し、一定時間経過後に薄膜状のゼラチンが溶けて、芯材の硫酸鉄を放出。タンニン酸と反応して発色し、文字が消える仕組み

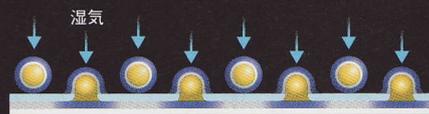
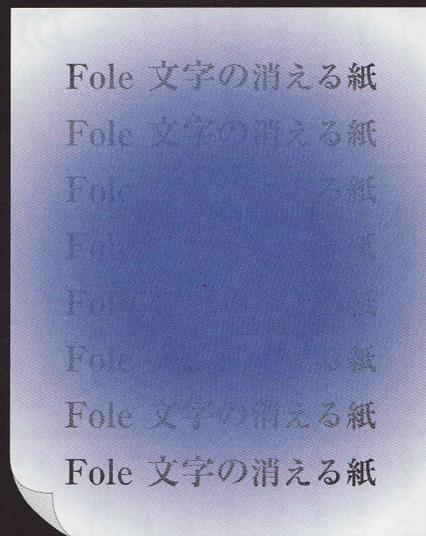
一定時間経過後に、自然に文字が消える インテリジェント機能紙

インテリジェント機能紙とは「何らかの知能を付与した紙」のことで、外部環境（温度や湿度、体内成分、化学物質など）に反応して、機能を発現することができる。「一定時間経過後、セキュリティ情報が可視または不可視できる紙」「温度調節機能を備えた紙」「温度や体内成分に反応して医薬品や農薬などを放出する紙」などの創出が期待されている。ここでは自己発色性マイクロカプセルを活用した「自然に文字が消える紙」を紹介

特徴 1 マイクロカプセル化・高分子ゲル化技術で機能材料の成分を保持・徐放

特徴 2 紙表面のナノ界面で機能材料を直接合成・定着させるだけで製造可能

特徴 3 専用プリンターや文字消去装置など特別な装置は不要で簡便なシステム



■自己発色性マイクロカプセルの構造



棄方法といえる。こうした環境とセキュリティーという二律背反しがちな要請にこたえるのが、冒頭のインテリジェント機能紙だ。

素材自ら「知能」をもち 人為的操作や専用装置は不要

市浦准教授は、九州大学農学部林産学科を卒業し、愛媛県紙産業研究センターを経て現職に就くまで、一

貫して機能紙の研究を続けてきた。機能紙というのは、情報の記録や包装・拭き取りといった紙がもっている本来の用途に、脱臭・防錆・濾過・吸着・耐薬品性などの新しい機能を付与したものだ。一九八〇年前後から研究が始まった成熟した分野で、市浦准教授自身も、光触媒やゼオライトなどを活用した製品開発にかかわっていたが、その一方で行き

詰まりも感じ始めていた。「機能紙の研究は、世界でも日本がトップを走っている分野ですが、紙に何かを塗ったり混ぜ込んだりして機能を付加する技術はすでに確立されているため、これ以上の広がりが期待できない状況といえます。次世代の紙の展開を考えたときに、ほかの分野で脚光を浴びていたインテリジェント材料という存在が目につい

たのです。紙をシート状の材料と考えれば、応用できるのではないかと「思いました」（市浦准教授）
インテリジェント材料は「材料自体が環境条件を検知し、自ら判断して、適切な機能を発現する」という、いわば「知能」をもった材料のこと。「スマート・マテリアル」とも呼ばれ、日本では九〇年代ころから、次世代材料の一つとして各分野

取材・文 木村元紀 写真 林景沢

で研究が始まった。すでに実用化が進んでいる分野としては、体内に摂取してから特定の症状が出たときに薬剤を放出する「ドラッグ・デリバリー・システム (DDS)」に用いる医薬品、機械や建物などに損傷が発生すると自動的に補修する自己修復材料などが知られている。こうしたインテリジェント性を紙に応用しようとしたのは、市浦准教授が初めてだった。

環境検知と自壊、時間制御ができる マイクロカプセルの調製に成功

ポイントとは、直径一ミリの満たない微小なマイクロカプセルを使った技術にある。古くは五〇年代にアメリカで開発されたノーカーボン複写紙までさかのぼる。これは、発色剤を塗布した紙に、無色の液体染料を閉じ込めたカプセルを接着し、筆圧でカプセルが壊れた部分にだけ色が出て印字される仕組みである。最近では、こすると匂いが出る香料マイクロカプセルや、温度の高さによって異なる色を発する液晶をマイクロ

すでに存在する。ただ、これらの技術は、専用のプリンターやインクを使って印刷した後に文字消去装置にかけるなど、人為的な操作や特別に開発した機器を必要とする。これに對して、市浦准教授が研究を進める「自然に文字が消えるインテリジェント機能紙」は、ごく一般的なプリンターで印刷して一定時間がたつと、何もしないでも紙自身が勝手に文字を消し去ってくれるのだ。なぜ、紙自身にそんな芸当ができるのだろうか。

カプセル化したものをシート状にした製品も出回っている。これらも高付加価値をつけた機能紙の一種といえるが、何らかの操作が必要だったり、環境変化に関係なく常に機能が発現してしまうため、次世代の紙とはいえない。「インテリジェント機能紙には、二つのポイントがあります。一つは、環境条件を自ら感じとってマイクロカプセルから機能材料を放出すること。二つ目は、いつ機能が発現する

かを制御できることです。つまり、マイクロカプセルにはセンシング機能を伴う自壊性と時間コントロール機能が必須です」(市浦准教授)

この機能をもたせるために、まずは素材選びからスタートした。文字を消す機能は、カプセル内の芯材として隔離した硫酸鉄と、紙に塗布したタンニン酸を反応させることで濃い青紫色に発色させ、黒っぽく塗りつぶすという形で実現できる。カプセルの殻となる薄い膜材の素材として選んだのは水溶性のゼラチンだ。空気中の湿気と反応して溶けることで、「環境条件の検知と自壊性」が可能になった。問題は、時間のコントロールだ。

ゼラチン膜だけでは、吸湿性が低く壊れない。そこで、ゼラチン膜の外側に吸湿性をもつグリセリンを累積することを思いつく。グリセリンは、水分を吸収してゼラチンに受け渡す役目を果たす。その濃度を変えることで、ゼラチンが溶けるまでの時間をコントロールできるのである。こうして発色させる原理と、その機能を発現する自己発色性マイクロカプセルの調製に成功した。「現段階では、気温二三度、相対湿度五〇％で、二〇〇時間、約一週間

後に発色するところまで制御できています。実用化にあたっては、最低でも一カ月、できれば一年程度の時間コントロールができることを目指しています」(市浦准教授)

紙表面で接着剤を使わずに 自己発色材料を合成・定着

インテリジェント機能紙を実現するには、もう一つのハードルがあった。マイクロカプセルと紙を複合化させる技術だ。

従来のマイクロカプセルを用いた機能紙は、ほとんどが印刷や接着剤で塗布する方式が使われている。ところがこの方式では、マイクロカプセルの表面が接着剤で覆われてしまい、空気中の水分を検知したり、自壊して機能材料を放出することができなくなる。どうすれば接着剤を使わずにインテリジェント機能をもつた材料を紙に取り込めるのか。

そこで市浦准教授は「紙の上でマイクロカプセルを直接作ってみよう」とひらめいた。採用した方法は、水と油の境界面でプラスチックなどの高分子を合成できる界面重合法である。これを紙の表面上で行うのは初めての試みだった。水溶性のモノマーを含ませた紙を、ある特定

の有機溶媒の中に浸けると、紙の表面にマイクロカプセル状になった高分子の膜が自然に合成されることを見いだした。

「常温で自然放置するだけで、溶剤に入れた瞬間に反応が起きました。高温にしたり圧力をかけたりする必要はありません。しかも、従来はマイクロカプセルを作るか購入し、接着剤に混ぜて紙に塗るという二工程を要していましたが、この方法ではカプセル化（合成）と複合化（定着）を同時にできるため、プラントを造る場合もシンプルな一貫生産体制を構築できるのです」（市浦准教授）

市浦准教授の開発したインテリジェント機能紙の複合化技術は、過大な設備投資を必要とせず、現在の生産設備を改良するだけですむという点で、中小製紙メーカーにとっても大いに魅力がありそうだ。

製造技術の応用で 高機能シートへの展開も可能

自己発色性のマイクロカプセルを紙に複合化する技術を確立したが、この機能を応用すると、必要なときに文字が浮き出る機能をもたせることも可能だ。例えば、契約書などの有効期限がきたときに知らせる文書

管理用や、送付された文書が受取人に届いたときに文字が現れる輸送安全確保用など、可視化と不可視化の両面での展開が期待される。

情報セキュリティにかかわる用途以外にも、市浦准教授は農薬シートの開発を同時に進めている。例えば、作物の病気や害虫が発生しやすい温度になったときに農薬を放出させることで農薬の使用量を減らしたり、残留農薬を回収する機能をもたせれば二次被害も防げる。

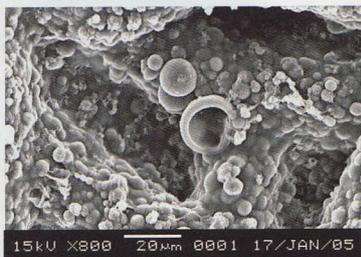
また、界面重合法を使ってシート状の材料に高分子を複合化する際に、有機溶媒の種類を変えることで、マイクロカプセル状のほかに、多孔状やファイバー状の薄膜を形成することができることを発見し、紙にさまざまなインテリジェント機能を加える道を開いた。

「化学物質の吸着や触媒効果をもった高機能フィルターなど、ナノファイバー状の薄膜に何か別の機能をもたせることで、さまざまな応用展開が可能になります。将来的には、ヒトの体内環境や住環境を改善するような手軽なシート材料を開発したいと考えています」（市浦准教授）

インテリジェント機能紙が身近な存在となる日も近い。

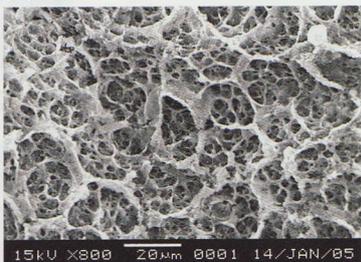
■膜の形状に応じた用途展開

マイクロカプセル状



芯材と膜材の組み合わせで、徐放性（放出速度が遅い）をもつ多様な機能材料ができる

多孔状



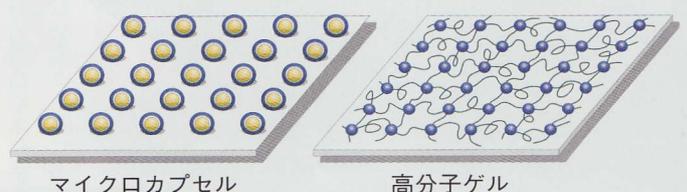
広い表面積を利用した触媒、環境浄化などの機能をもたせることが可能

ファイバー状



高性能フィルターやセンサー、再生医療向けなどとして活用できる

■シート状素材に付加できる薄膜の形と態

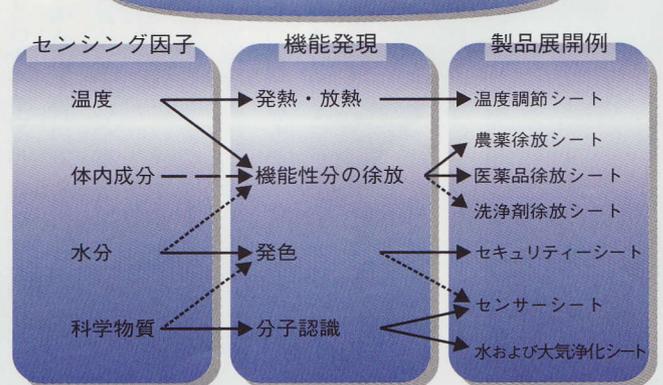


マイクロカプセル

高分子ゲル

界面重合法で用いる有機溶媒やモノマーの種類を変えることで、さまざまな薄膜を形成できる。有機溶媒にシクロヘキサンを用いると膜がマイクロカプセル状になる。モノマーを変えることでできる高分子ゲルは、固体と液体の中間的性質をもつ網目構造の物質。その網目部分に機能材などを包むことができる

インテリジェント機能紙の展開例



画：笹沼真人