キーワード

インテリジェント材料, センサ, アクチュエータ, 知能材料,
ファジー材料

正 員 高 橋 清
帝京科学大学

1. はじめに

インテリジェント材料も、その概念の誕生から12年を経過し、人間に例えれば丁度小学校を卒業し、中学生になったところである。本稿では、その誕生の経緯から・現状・将来像について一瞥してみたい。

2. インテリジェント材料概念の誕生

インテリジェント材料の概念の誕生は、今から12年前の、1985年に遡る。同年科学技術庁で、これからの日本の科学技術では何をなすべきか?という将来予測を検討する「革新技術を目指した基礎的研究の方向に関する調査」委員会が発足した。筆者もその委員の一人であった。

当時筆者はセンサの研究開発を行っていたが、センサだけではもの足りず、もう少し高次の、知能の高いものはないだろうか、と思いを巡らしていた。勿論当時は、インテリジェントセンサ、或いはスマートセンサなどが話題になっていた。しかし当時のインテリジェント(スマート)センサの概念は、センサとプロセッサ(電子回路システム)とのハイブリッドシステムであった。筆者は、「このようなハイブリッドシステムではなく、センサ材料自体にプロセッサならびにアクチュエータ機能を持たすことが出来ないだろうか」、と常々考えていた。

そこで図1に示すように、

「センサ」・「プロセッサ」・「アクチュエータ」

を、モノリシックに集積できないだろうかと考え、これを「インテリジェント材料」と呼ぶことにし、この概念を、その委員会で提案した¹⁾。

もしもこのようなインテリジェント材料ができれば、図2に示すような効果が期待できる。

当時このようなインテリジェント材料のことをいうと、「材料に知能があるはずがない。知能があるのはコンピュータだけである。」と言われ、相手にされなかった。しかし一方では材料のインテリジェント性を認める方もおられ

た。そこで2年後の1987年の夏に、それらの方々にお集まりいただき、「インテリジェント材料」についての座談会を行い、インテリジェント材料の概念等について意見交換を行った。その座談会の内容は、「インテリジェントマテリアル」と題して、日刊工業新聞社から単行本として出版された²⁾。

その頃からインテリジェント材料という言葉も、何となく認められるようになった。

丁度この単行本が出版された1987年になって、科学技術庁で筆者の提案したインテリジェント材料が採り上げられて、科学技術庁の航空・電子等技術審議会で、2年間にわたりその概念の構築が行われた³⁾。

そこで行われたインテリジェント材料の概念は、本質的には1985年に筆者の提唱したものとはほぼ同一の内容であった。

この科学技術庁での概念構築の後、それを基にして筑波で第1回のインテリジェント材料ワークショップが開催された。このワークショップを契機として、インテリジェント材料というものが、我が国は勿論、国外でも認知されはじめた。特にアメリカでは逸早くインテリジェント材料関係のジャーナル「Journal of Intelligent Material Systems」が出版された。その後第1回国際会議が大磯で開催され、以後2年ごとに、アメリカ地区、ヨーロッパ地区、アジア地区で開催されることが決められ、来年秋には第4回が再び日本で開催されることになった。これらの様子を表1に示す。

図1 インテリジェント材料の説明図

Present and Future from the Birth of Concept on Intelligent Materials.

By Kiyoshi Takahashi, Member (Teikyo University of Science & Technology).

表1 インテリジェント材料の歴史

1985年	インテリジェント材料の概念の提案 (日本：筆者による)
1987年 ～89年	インテリジェント材料の概念構築 (科学技術庁)
1989年	第1回インテリジェント材料 国際ワークショップ (筑波)
1990年	US-JAPAN ワークショップ (米国：ハワイ)
1990年	インテリジェント材料フォーラム発足 (未踏科学技術協会)
1991年	Asia-Pacific ワークショップ (オーストラリア)
1992年	第1回インテリジェント材料国際会議 (日本：大磯)
1994年	第2回インテリジェント材料国際会議 (米国：ウィリアムスバーグ)
1996年	第3回インテリジェント材料国際会議 (フランス：リヨン)
1998年 (予定)	第4回インテリジェント材料国際会議 (日本：千葉)

3. インテリジェント材料とは

それではインテリジェント材料とは何か？これまでのインテリジェントシステムでは、「センサ」・「プロセッサ」・「エフェクタ (アクチュエータ)」の三つが、それぞれ別々のデバイス、あるいはシステムで構成されている。これらを図1に示したようにモノリシックに集積したものがインテリジェント材料とすることが出来よう。

すなわちインテリジェント材料とは、「材料にソフトウェアをもたせたもの」である。

ところで、出来れば材料の中にエネルギーまでもモノリシックに入れることは出来ないであろうか。現在はそれが出来ないで、外部から電池を接続している。エネルギーも材料の中に取り込める可能性としては、光起電力効果、ゼーベック効果などが当面考えられる。究極としては、相対性原理の教えるところによる「質量はエネルギーである」事を利用する可能性はないであろうか。

4. インテリジェント材料への期待

インテリジェント材料には、図2に示したような効果が期待できる。

すなわち環境の変化に対応する環境判断機能を有し、かつ生体材料の如く、自己修復機能を備え、また材料の性質が、プログラム通りに時間に対して特性が変わるとか、或は材料が成長、または自己増殖するとかの、いわゆる時間軸機能、即ち進化する様な効果を期待したい。

このような効果を持ったインテリジェント材料が出来るとどのようなことが出来るか、希望的具體例を含めて2, 3の例で眺めてみよう。

① 医薬の分野においては、薬剤自体が病状によって変化化する化学的、あるいは物理的変化をセンシングし、その信号によってその部位で薬物を放出する。たとえば抗ガン剤が体内を通過するときガン細胞のみを感知してそこへ抗ガン剤を送り込む。このようなシステムは薬物送達システム (Drug Delivery System: DDS) と呼ばれており、精力的な研究開発が行われている。

② 生体内に挿入された人工骨や人工臓器部品、人工血管などと生体自体の馴染みをよくするような材料、あるいは、生体の成長や治癒状態をセンシングして、人工材料自体が成長、あるいは分解・消滅する。

③ 構造材料においては、材料内部の亀裂、表面クラックの発生などを自己センシングして、その部分の色が変わるなどして警告を発する (自己診断)。さらにそれが進んで、例えばその損傷部分近傍の材料が溶出するなど、材料物性が変化して亀裂部分を充填し、自己修復する。自動車のタイヤが、パンクすると自分で直る、即ち「自己修復機能」があるが、これはその例である。

④ インテリジェント材料としての条件、即ちセンサとエフェクタ (アクチュエータ) とを兼ね備えたものとして、形状記憶合金を挙げることが出来る。形状記憶合金は、温度センサ・アクチュエータとして商品化されている。

⑤ PTC (Positive Temperature Coefficient) セラミックスは、ある温度までは電気抵抗が小さくて、ある温度から急に大きくなる。これをヒーターに使うと、低い温度の時には電流が流れて温度が上昇する。ある温度に達する

図2 インテリジェント材料の各種機能

と、温度が高くなったことを自分でセンシングし、電流を小さくするスイッチ作用を自分で行う。これはセンサとアクチュエータ（スイッチ）並びにきわめて初歩的なプロセッサを備えたもので、立派なインテリジェント材料である。

これらは2, 3の例に過ぎないが、われわれ人間は正にこれらの機能を持っている。怪我をすると「痛い」と自己診断し、自然に治癒する（自己修復）。

生体の構成材料（以下生体材料と略称する）は、この様な機能を全て兼ね備えており、生体材料は正に理想的なインテリジェント材料である。

上記のごとくインテリジェント材料は既にいくつかは現存している。しかしこれら既存の材料は、インテリジェント性が極めて低く、幼稚園の園児（失礼？）程度である。

5. インテリジェント材料の創製は可能か

生体材料以外の自然材料では、余り多くのインテリジェント性を期待する事は出来ず、やはり人工的に創り出す必要がある。

次にインテリジェント材料創製の具体例について述べてみよう。

①マクロスコピック手法（階層構造によるハイブリッド化）

高分子材料は、人工的に設計された材料である。これはエレクトロニクス材料であるSiに比べて、次のような点で遥かに素晴らしい材料である。天然の絹に代わるものとして絹よりも強いナイロンが人工的に作られた。これまでの高分子材料は、このように強さを問題にして材料設計（分子設計）されたいわゆる構造材料であった。最近、情報受容機能タンパク質とエフェクタ機能タンパク質で、分子レベルの超微小スケールから、マクロスケールまで、種々の階層で、インテリジェント材料を創製しようとする試みがなされている。更には刺激応答型高分子ゲルの分子設計論を導入したインテリジェント材料創製などが試みられている。

一方無機材料の方に目を転じると、構造柔軟性・構造感受性を利用した微結晶やアモルファスなどの非熱平衡材料設計、更には種々のマルテンサイト相を利用した材料設計（主として金属）などが試みられている。

なお高分子には高分子の、金属には金属の、半導体には半導体の、またセラミックスにはセラミックスのそれぞれ素晴らしい性質がある。これら材料を組み合わせ、できればモノリシックに形成して、それぞれの材料の優れた特性が発揮できるように材料を階層化し、役割分担をもたせてインテリジェント材料を創り出そうとする思想がある。例えば金属でセンサを、半導体でプロセッサを、セラミックスでアクチュエータを、モノリシックに形成するのである。

②メゾスコピック手法（微粒子制御）

超微粒子の分散、ハイブリッド化、など粒子デザイン、アSEMBLなど微粒子制御によってインテリジェント材料を創製しようとする方法である。セラミックスは、まさに

この範疇にはいる。

③マイクロスコピック手法（原子あるいは分子構造制御）

更にこれをおし進めて行くと、それぞれの材料を構成している原子を、バラバラにして、それらの構成原子を好きなように並べて新しい材料を創り出そうとするところまで行ってしまう。

今後の材料としては、この様な分子設計、あるいは原子設計にもとづく複合材料開発が不可欠であろう。換言すると、「材料科学における遺伝子制御」或は「遺伝子組替え」とでも言うべき手法である。

最近は無機材料、特に半導体材料に於て、原子設計に基づく遺伝子組替えで、所望の材料を設計しようとする新しい材料の創出が行われている。現在は、原子を動かして配列させる基本技術が開発され始めた。この手法によって、原子を任意に配列し、更には原子自体を創り出し（人工原子）、この人工原子を3次元的に任意に配列し、全く新しい材料を創製しようとの試みがなされている。この「人工原子の人工配列」が、人工材料の究極点であり、インテリジェント材料創製の基本原理ではなかるうか。

6. インテリジェント材料創製のためのプロセス

STM（Scanning Tunnel Microscope）、Photon-STM、AFM（Atomic Force Microscope）等の技術を用いたアトミックマニピュレータ、あるいは電界、磁界、光子、フォノン、荷電ビーム、などによる分子制御を行うモレキュラーマニピュレータにより、任意に原子・分子を操り、原子・分子を配列制御する方法が求められる。

また熱エネルギー（インコヒーレントエネルギー）の代わりに光エネルギーなどのコヒーレントエネルギーの利用が重要である。

これは正に究極のプロセスで、「量子化プロセス」と筆者は呼びたい。この量子化プロセスをまとめて図3に示す。

図3 量子化プロセス

7. 究極の姿

原子を自由自在に配列できるようになると、極めて小さい領域に電子を閉じ込めることが出来る。そうすると、電子は粒子ではなく、波動としての性質を現わす。即ち量子効果が現れる。

電子が波動として振る舞うと、振幅、波長、位相を、それぞれ独立に制御することができ、粒子の場合と比較して制御可能な変数は3倍、いや3乗倍になる。更に他の量子波、即ち「光波」、「格子波」等、「物質波」との相互作用も期待でき、粒子ではみられなかった各種の機能が期待できる。

このように材料中の電子を波動として取り扱うことが出来るようになると、これまで全く予想もできなかった機能を生み出すことが期待できる。それらの機能の中に、インテリジェント材料の機能、いや知能が秘められているように思われる。その秘められたペールをはがすのが、我々の今後に課せられた課題であろう。

8. ファジー材料

原子レベルで任意材料の創製が可能になると、金属、絶縁体、あるいは、無機物、有機物、高分子、生体材料、等の材料を、区別することは無意味になる。そこでこのような材料を筆者は「ファジー材料」と呼びたい。

尚蛇足であるが、このファジー材料は、ハード的な捉え方であるが、ソフト的には「知能のみでなく、知恵、即ち感情までもった材料」をファジー材料と呼びたい。人間の顔色は、感情によって変わるが、これは正にファジー材料である。

ファジー材料などというと、10数年前と同じように、「材料に感情など無い、馬鹿をいうな」と、一笑に付されそうであるので、ファジー材料については、これ以上触れず数年後に触れる機会が来ることを期待したい。

9. ナノスペースラボプロジェクト

以上述べた思想に基づき、インテリジェント材料を実際に創製しようとするプロジェクトが、1994年科学技術庁の主導で「ナノスペースラボプロジェクト」としてスタートした。

このプロジェクト参加者は、電子は勿論、金属、化学、生物、医学、物理、等、各分野の専門家で構成されている。その詳細については本稿では省略するが、このプロジェクトにより、我が国で提唱されたインテリジェント材料が、任意に設計・創製されることを期待したい。

10. おわりに

現在はまだインテリジェント材料が設計できない状態であるので、インテリジェント材料である生体材料をそのまま拝借して、たとえばバイオセンサを作っているのが現状である。本来は、生体材料以上の働きを持った材料の開発が望まれる。この意味では、生体材料は、インテリジェント材料の参考書であり、教科書ではない。

更には、「知能」のみではなく、「知恵」、即ち「考える」能力を持った材料（heart-wareをもったファジー材料）の出現も期待したい。しかし「考える材料」の出現は永遠にこないことを願う。何故ならば人間の、他の物が絶対犯すべきことの出来ない神聖な特技は、「考えること」であろう。「考える」と言う神が人間に与えてくれた最大の贈物が他に犯されてしまったならば、人間の存在価値が無くなってしまう。

しかし現代の科学技術は、この神の最大のプレゼントに敢然と立ち向かっている。これは正に神に対する冒瀆ではなかろうか。

インテリジェント材料の出現の近いことを夢見て筆を置く。

(平成9年5月6日受付)

参考文献

- 1) 「革新技術を目指した基礎的研究の方向に関する調査(化学系の研究開発方向調査)」昭和60年度科学技術庁委託調査研究報告書(工業開発研究所)
1986年3月
- 2) 桜井靖久, 雀部博之, 高橋 清, 宮田清蔵, 三輪敬之, 柳田博明 「インテリジェントマテリアル」 日刊工業新聞社 1987年
- 3) 「環境に知的に応答し、機能を発現する能力を有する新物質, 材料の創製に関する総合的な研究開発の推進について(諮問第13号)に対する答申」 航空・電子等技術審議会, 科学技術庁 1989年11月

高橋 清 1934年8月22日生。57年3月東京工業大学電気工学科卒業, 62年3月同大大学院博士課程修了。工学博士。64年同大助教授, 75年同教授。専門: 固体電子工学。95年定年退官。現在, 東京工業大学名誉教授・帝京科学大学教授, 電気学会E部門長。