

《定例セミナー》

インテリジェント材料

-Intelligent Materials-

東京大学先端科学技術研究センター長

東京大学教授 柳田博明

Director and Professor

Research Center for Advanced Science and
Technolgy, University of Tokyo

1. はじめに

時代はその時代を特徴づける素材で定義される。その時代に用いた素材に従って、人類は石器時代、土器時代、鉄器時代、プラスチック時代を経てきた(表1)。

今、情報化社会に迎えつつある。この時代を特徴づける素材は何であろうか。情報化社会での素材の役割はどのようなものになるであろうか。情報技術には、処理、伝達、記録などの要素があり、それらの各々に新しい素材が使われるようになってきた(表2)。

しかし、素材自身は未だ知能-インテリジェンスを持ったものとは位置づけられてはいない。現代の技術は、知的な情報処理のすべてをコンピューターに任せ(コンピューター依存症候群)、材料には構造体としての耐久性または単純な機能だけを第一義的に求める方向に進んでしまっているように見える(材料痴呆化症候群)。材料を使う際に、材料に関する情報はリード線を通じてコンピューターに伝えられ、コンピューターで判断された指令またはリード線を通じて材料に送り返される。情報、指令の数が増えるほど結線の数が増え、ついにはスパゲッティ症候群と呼ばれるむさ苦しさが出現するようになる。結線の数が増えれば増えるほど故障の確率が高くなり、制御系が暴走し致命的な破壊につながることも多くなる。もし材料に少しでも自己処理機能をもたせることが出来れば、結線の数減らすことができ事故を減らすことが出来るはずである。材料を知的化することがシステムの安定性を高めるために必要であり、インテリジェント材料

新技術 Innovation of New Technology	→	新しい社会 New Civilization
石器 Stone wares	→	石器時代 Stone Age
土器 Earthen wares	→	土器時代 Earthen ware Age
鉄器 Iron wares	→	鉄器時代 Iron ware Age
プラスチック Plastics	→	プラスチック時代 Plastic Age
情報技術 Information Technology	→	情報社会・知識器時代 Information Society Knowledge ware Age

表 1

新材料 New Materials	→	新デバイス・技術 New Devices・Technology
超伝導体 Superconductors	→	?
高純度シリカ繊維 Ultra pure silica fibers	→	光通信 Optical communication
チタン酸バリウム Barium titanate	→	エレクトロニクス Electronics
酸化亜鉛バリスタ Zinc oxide varistor		
		etc.

表 2

が求められる由縁である。

インテリジェンスの概念としては、

- (1) 自己修復
- (2) 自己調節
- (3) 自己診断
- (4) スタンバイ機能
- (5) 特性の外部制御

等がある。これらは、これまで生物においてのみ実現されると考えられてきた。しかしこのようなインテリジェンスを素材の中に発現させることを考える場合には、生物が生きられない過酷な環境で使用される材料にインテリジェンスを持たせることも要求されるのである。

2. 材料の開発史

歴史を遡ると、材料の使命は、構造・容器材料あるいは加工工具材料であった。構造・容器材料としての源泉は土器であり、加工工具材料の始まりは石器である。プラスチックそして合金を含む金属の開発も、ほとんどがこの役割を追求して来たものであった。これらの材料に要求されることは、より作り易い(大量生産に向く)か、より優れた特性を持つことである。

最近になって、新しい観点での材料が登場してきた。電氣的、化学的、生物的などの面で、能動的な機能を示すものが現れたのである。すなわち、外界の状況変化に伴って特性が変化し、逆に特性の変化から外界の状況変化を知ることが出来る材料(センサー材料)、熱エネルギーとか化学ポテンシャル等を電気エネルギーに変換する機能を持つ材料(トランスデューサー材料)、ある特定の分子だけを捕捉する材料(分離材料)等である。これらを機能材料と呼び、現代の材料研究は機能材料に大きくシフトしたと言える。機能材料は、これまでの構造材料とは異なった価値観で研究開発が行われる。機能材料については、特性の向上というよりもまず新規機能を持つ材料の開発が、大量生産を図るよりも新デバイス構築のコア材料として使うことに努力が向けられるため、技術体系における材料の位置づけが異なっている。

しかし、機能材料ですら、現代または近い将来の材料への高度な要求に答えるには充分でない。今要求されている材料はインテリジェンスを持つ材料である。インテリジェント材料はコンピューターへの過度の依存によるシステムの安定性の喪失を救ってくれる。また、インテリジェントセラミックスを使えば、生体が耐えることが出来ない過酷な条件下でも、生体にしか具備されていないと考えられやすいインテリジェントな機能を、人類は獲得できるのである。

3. インテリジェント材料の事例

(1)半導性チタン酸バリウムセラミックス

この物質のPTC特性として、抵抗が温度によって大きく変わる。この材料をインテリジェント材料の観点からみてみよう(図1)。まず小さい抵抗を示す温度領域では、大きい電流が流れてヒーターとなる。ところが温まって抵抗が増え始める温度になると、電流が流れにくくなり、無理やり流そうとしても抵抗の増加が著しく、もう温度は上がらなくなる。温度が下がると、電流が流れ易くなるので再び熱を発生し温度が上がる方向に働く。その結果、この素子では温度はいつも一定に保たれるので、温度測定のためにわざわざ温度計を付ける必要もないし、温度制御のための回路を組む必要もない(自己調節、安定型)。

これに対して、通常の半導体(NTCサーミスタ)であると、電流を流すと発熱し、発熱すると温度が上がり、温度が上がると抵抗が減少し、ますます電流がながれ易くなり、温度上昇は加速され、ついには焼き切れてしまう(暴走型)。このため、この素子には暴走を防ぐために保護回路を組み込む必要が出て来る。PTC材料とNTC材料のどちらがインテリジェントか一目瞭然である。

(2)半導体繊維を用いる赤外線センサー

現在用いられている赤外線センサーには、量子型、

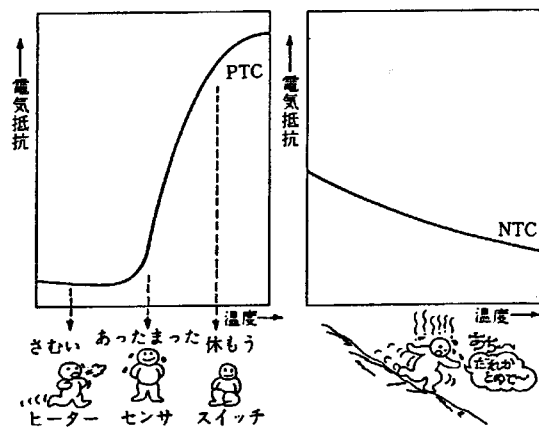


図1. 2種類のサーミスタ

[柳田博明著:ファインセラミックス
(講談社ブルーバックス第20印付録)より]

サーミスタ型、焦電型の3種類がある。量子型は高速・高感度であるが、冷却を必要として高価である。サーミスタ型は安価であるが、高速・高感度とは言えない。焦電型は安価で高速・高感度で最も多く用いられているが、その動作機構上静止体からの赤外放射を検出できない。これを検出できるようにするためにチョッパを付けるなど機械的にも回路的にも複雑な工夫をしている。そこで、材料でインテリジェント化してサーミスタ型の高速度を図った。炭化ケイ素や炭素などの半導体繊維の熱容量が小さく温度で抵抗が変わる性質を利用し、高速でしかも静止体も検出できるセンサーの開発に成功した。回路も機構も焦電型のものに比べて簡潔である。

4. インテリジェント材料の要件

インテリジェントな機構とは、まず 1)自己診断、2)自己調節、3)自己修復(スタンバイ特性を含む)である。この中のあるものには 4)自己増殖あるいは成長も含まれる。これらの機構を第1段階のインテリジェンスという。次に、これらの動作点を使用者の意志によって変更できる 5)チューニング機構が備わるとインテリジェンスのレベルが向上する。そこで、これを第2のインテリジェンスという。

(1)自己診断性

生物は、自己の異常を他者に知らせることで助けを受けられる。材料にこのような自己診断機構を備えられれば、劣化に対して有効な対策を講じることができるインテリジェント材料の研究は機能材料に限ったことではなく、かえって構造材料の方にこそインテリジェント機構の付加が必要なのではないだろうか。まず自己判断して何か異常があれば信号を発してくれるならば、そこへ修理に駆けつければよい。現在でも材料での亀裂の進行をAE(Acoustic Emission)で検出する手法は学問的には適用されているが、実用材料すべてにこの手法を適用するのは経済的にナンセンスである。より簡便な方法で異常を知らせる機能を与えなくてはならない。

(2)自己調節性

インテリジェンスの見地からすれば初歩的ではあるが、フィードバック回路によらない自己調節素子は1000℃以上では温度と共に抵抗が増加するSiC発熱体などで既に幾つかある。最も典型的な自己調節機構はペロブスカイト型セラミック発熱体(PTC)に見られ、NTCサーミスタ型ヒーターとのインテリジェンスの顕著な差は前述した通りである。

人工心臓は、拍数かける容積の血液量を排出する。体温が一定である間は排出量が一定であっても良いが、体温が変化したときには排出量を変えないと器官は維持できない。生命体では、拍数を変えてこの要求に応えているが、人工心臓ではペースメーカーの拍数は一定である。体温に応じて拍数を変えることは回路的には可能であるが、故障を増やすもとなる。体温に応じて容積が変わる人工心臓が欲しいとのことである。

建築材料において、温度、湿度に応じて通気性が変化する木材のようなものは、インテリジェンスの観点からすれば自己調節型である。

(3)自己修復性(スタンバイ機構を含む)

生物は自己修復機能によって特性を回復することができるが、ほとんどの材料では劣化を避けることが出来ない。自己修復機能の欠如による不都合の例は、多孔質セラミック半導体を用いた湿度センサーに見られる。多孔質材料の導電率は、高湿度下では水蒸気の吸着により増加し、乾燥時には吸着分子の脱離で減少する。しかし、室温程度

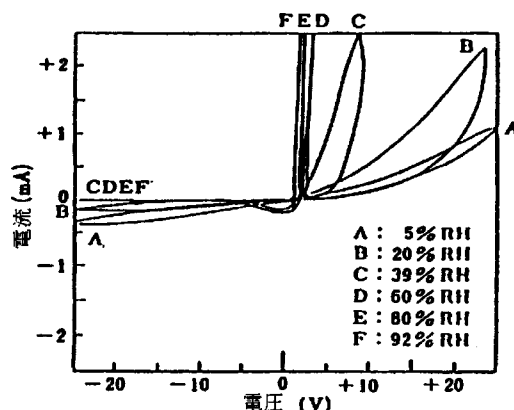


図2. CuO/ZnOヘテロ間接触電圧-電流特性の湿度依存性

	多孔質酸化亜鉛湿度センサ	CuO/ZnO接触系湿度センサ
構造	同種物質間開界面	異種物質間開界面
測定量 (動作機構)	吸着水量に対応する 導電率変化	吸着水蒸気の電気分解 電流量
履歴	あり	なし
清浄化処理	必要	必要なし
自己修復機能	なし 清浄化処理必要	有効に動作

表3. 2種のセラミックス系湿度センサの差異

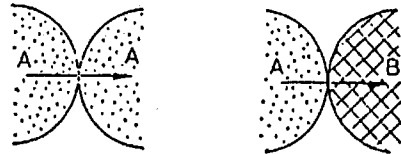


図3. 2種のセラミック湿度センサの二次元構造の概念図

(左)多孔質ZnO湿度センサ
(右)CuO/ZnO接触系湿度センサ

ではこの水分子の脱離が非常に遅く、しばしば「クリーニング処理」と称して高温で吸着水を飛ばす操作を行わなくてはならない。ところが、著者らが開発した新しいタイプのセラミック湿度センサはp型半導体(CuOまたはNiO)とn型半導体(ZnO)の点接触を用いている。図2に示すように湿度によって電圧電流特性が変化する。この動作機構は、ヘテロコンタクト付近の吸着水が電気分解を受けていることによって説明される。クリーニング、あるいは自己修復機構が動作そのものであるから、測定中にクリーニング過程が常に働いていることになる。通常多孔質セラミック湿度センサとこのpn接触タイプとの比較を表3と図3に示す。pnタイプの方が、インテリジェンスに関して大きな可能性を持っていることが解る。

その他、従来の材料では、アルミ箔コンデンサが自己修復の典型例である。構造材料でもこの概念を導入することにより、使いやすいものが得られるはずである。自己修復は次の動作を行うまでのスタンバイと言ってもよい。たとえ動作時に特性が劣化しても休息することにより性能が復元すれば立派な自己修復である。トランジスタ、形状記憶合金、等がこの例である。

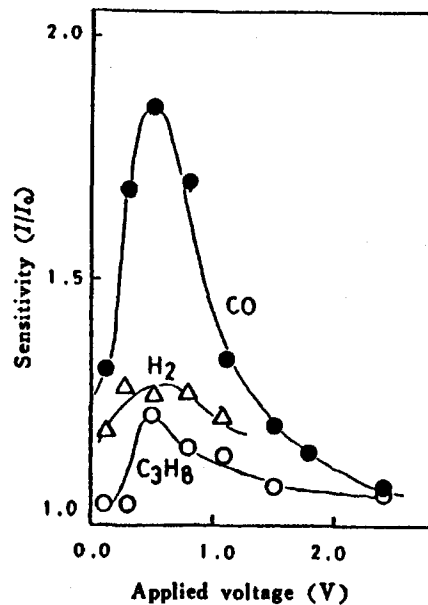
(4)自己増殖、あるいは自己成長機構

近ごろ、生体内に人工骨、人工血管あるいは人工臓器などがインプラントされるようになってきた。この時一つの障害になるのが小児へのインプラントである。小児は成長するがインプラントされた人工物は成長しない。もし他の器官と並行して成長させることが出来ればこの障害は取り除ける。自己増殖とか自己成長とか言う生命体だけが行うと思ってしまうがちであるが、結晶成長、

腐食など非生命体でも実際に起こっているので、うまく取り込むことを考えるべきであろう。

(5)チューナブル性(特性の外部制御)

材料の性質を外部から変えることをデバイスのチューニングと呼んでいる。セラミックコンデンサには印加電圧によって容量が変わるものがある。これはKerr効果、Pockels効果としてよく知られている。pn接触湿度センサは前述したが、一酸化炭素を選択的に検知するガスセンサとしても働く。感度は、pn接触にかかるバイアスを変えると変わる。CuO側を0.5V高くしたとき最も一酸化炭素に対する感度が高い(図4)。こ



●:with CO, △:with H₂, ○:with C₃H₈, respectively

Gas concentrations are 8000ppm

Measuring temperature is 260°C

図4. P-N接触系 ガスセンサーにおけるセンサー感度の電圧による変化

これはチューナブルと言える。このことは、電界で化学反応をコントロールできる可能性も示している。電界制御の難点は導線があることである。光学的あるいは磁気的方法でチューニングが出来れば、その材料はもっとインテリジェントであると言えるよう。

構造材料においても通常は自己修復機構が働いて丈夫で長持ちしているが、不明になったときその機構を停止させることができれば、建築廃材問題も解決できよう。

5. 材料設計の基本的概念

材料を設計する場合には、つぎの二つのことを念頭に置いておくのが良い。新規有用材料候補物質を探索しようとするとき、材料に不均一性(Heterogeneity)を導入することが、新規機能発現のために重要である。一方、候補物質の実用材料化を行おうとするときには、性能の向上と信頼性の確保のため、均質性(Homogeneity)の向上が必須である。このような観点から、インテリジェンス発現のためには、対立するもの同志の組合せが面白い。ちょうど、黒潮と親潮の合わさる房総沖にプランクトンが多く湧き、魚が集まりよい漁場になっているように。相異なる性質(例えば酸と塩基、P型とN型半導体、ホストとゲスト、酸化と還元等)を持つ2種(以上)の物質間の非線形相互作用、すなわち簡単にいえば相対するものが共存することが、新しいインテリジェンス発現の機会を与えてくれるだろう。このことは研究体制についても言えることである。計画性と偶然性、開発者と利用者、緻密性と勇猛性、まじめと遊びといった相反するものの組合せや、思考・性格の異なる人間の集団の相互啓発、学際性や国際性が新しい

材料開発のために必要な要素と言える。

新しい機能を持った材料を探索するには、三つの視点が必要であると思われる。その一つは理論的アプローチであり、理論と基礎実験に根拠をおく地道な研究である。二つめは偶然性(Serendipity)を確保することである。そのためには以前にSerendipityが得られたケースについて、研究開発者の人間性、発想法、価値判断などの要素についてよく解析し、多相系相互作用による新規機能の発現を期待する。もう一つは、偶然性を意識的に設計し、多相系相互作用の生起し易い状況を準備してやり、新規機能の発現確率を高めてやることである。Serendipityの例を紹介してみると、当初の目的からすると失敗だが別の観点でもよいものが得られた例(半導性チタン酸バリウム、酸化亜鉛バリスタ)、当初の目的を達しただけでなく別の良いものも得られた例(安定化ジルコニア、部分安定化ジルコニア)、別の方向も検討することで成功した例(高温構造材料や集積回路の基板材料としての炭化ケイ素)等がある。このようなSerendipityに恵まれるには、チャンスを高めるためによく働き、人の人生観を知るためによく遊び、基礎科学の重要性を身につけるためによく学ぶことである。そのほかよい勘を養い、よい協同作業をすることである。



図5. セレンディピティの例

参 考 文 献

- 1) H. Yanagida, *Angew. Chem.*, 100(10), p.1443-1446, (1988)
- 2) 柳田博明、*化学と工業*、39(11), p.831-833, (1986)
- 3) 柳田博明著「ファインセラミックス」
-講談社ブルーバックスB517(昭57年初版)
- 4) 柳田博明著「セラミックセンサー」
-講談社ブルーバックスB585(昭59年初版)
- 5) H. Yanagida, Overview Lecture US India
-Japan Joint Symposium upon Electronic Ceramics, Jan. 16, 1989. Pune, India.
- 6) K. Kawakami and H. Yanagida, *Yogyo-Kyokai-Shi (J. Ceram. Soc. Jpn)*, 87, 112, (1979)
- 7) H. Yanagida and Y. Nakamura, presented at the 87th Annual Meeting of the American Ceramic Society, 4-E-85, May 6, Cincinnati, 1985. Y. Toyoshima, M. Miyayama, H. Yanagida and K. Koumoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 22, 1933 (1983). Y. Nakamura, M. Ikejiri, M. Miyayama, K. Koumoto and H. Yanagida, *J. Chem. Soc. Jpn., Chemistry and Industrial Chemistry*, 1985(6)1154(1985)
- 8) Y. Nakamura, T. Tsurutani, M. Miyayama, O. Okada, K. Koumoto and H. Yanagida, *J. Chem. Soc. Jpn., Chemistry Industrial Chemistry*, 1987(3)477(1987)