エレクトロニックセラミックスによるセンサの インテリジェント化

Trends of Intelligent Sensor's Development using Electronic Ceramics

村 田 充 弘*

Michihiro MURATA

Key Words : Ceramic Sensors, Intelligent Sensors, Electronic Ceramics

1. はじめに

最近のセンサの発展、普及には目をみはるものがある。最先端の宇宙工学や医学、産業分野への応用から、我々の日常生活の中にまで、センサは広く利用され始めている。例えば、我々に身近な自動車や家電製品には多くのセンサが使われており、日本の産業を支えている産業用ロボットの分野ではセンサ技術と制御技術の高度化が進み、故障診断能力や自己修復機能を持つものまで現れは始めている。

こうしたセンサ技術の高度利用は最近のマイクロエレクトロニクス、特にマイクロコンピュータの発展と無関係ではない。マイクロコンピュータのおかげで複雑な信号処理も簡単になり、センサ固有のくせをソフトウェアで修正、補正することも可能となっている。以前であればすべての要求特性がセンサに求められ、過酷な要求特性のために実現しなかったセンサも多くあった。しかし、現在ではマイクロコンピュータの普及によって、センサ素子固有の特性が再現性さえ良ければ利用可能となった訳であり、用途に応じたセンサ素子の選択幅が広がっている。さらに現在では、センサ信号処理回路の集積化や、センサ素子と信号処理回路の集積一体化、マイクロコンピュータの利用などが進み、ソフトのハード化によってセンサ開発者の夢であったセンサのインテリジェント化が急速に実現されつつある。

このようにセンサのインテリジェント化にマイクロエレクトロニクスの果たす役割は大きいですが、センサ材料によるインテリジェント化も更に有効であり、また、今後その有効性は増大すると思われる。センサ材料はセンシング時に外部環境と接する最先端部であり、外部情報を電気信号などに信号変換する心臓部になっている。センシング部のインテリジェント化は後段の信号処理系の大幅な簡素化に役立つため、センサ材料のインテリジェント化がセンサの高機能化やマイクロ化に有効な手段となるのである。そこで、ここでは、センサ材料として有用なエレクトロニックセラミックスに焦点を当て、センサのインテリジェント化の動向を展望するとともに、エレクトロニックセラミックスがセンサのインテリジェント化にどのように役だっているのかについて述べてみたい。

2. センサのインテリジェント化動向

センサ素子の種類は多く、まさに千差万別である。そこで、検知対象に注目してみると、検知対象は大略次のように分類される。

1) 機械量、2) 熱量、3) 電磁気量、4) 放射線量、5) 化学量、6) 光学量

こうした検知対象に使われるセンサでは、センサの信号処理は通常電氣的に行われることが多いため、センサは図1に示すようにセンシング部で物理的、化学的信号やその信号変化を電気信号に変換するものと定義できる。

こうしたセンサからの電気信号が信号処理され、目的情報が得られるわけであるが、センサのインテリ

1993年 3月 31日受付

* (株)村田製作所(〒617 長岡京市天神 2-26-10)
TEL. 075-951-9111

図1 センサの信号変換と信号処理システム

ジェント化には信号処理のレベルによって種々の段階がある。そこで、まず初めにセンサのインテリジェント化をセンサ機能の点から考察してみよう。

第一ステップは信号処理のレベルで、センサ特性の補完等通常のセンサの使い方である。対象の量やレベルの検知が可能となり、センサの高性能化が課題となる。第二ステップは情報処理のレベルで、複合信号の統合や融合によって対象の状態に関する情報が抽出される。多くの信号を融合すれば対象の状態把握はかなり正確にできるが、複数の信号を同時に処理するリアルタイムパラレルアーキテクチャが開発途上であり、階層型並列分散処理構造をもつ人間の情報処理係に近づけることが今後の課題となっている。最終ステップが知識を獲得して利用する知識処理のレベルであり、学習、認識、判断などの機能が実現される。最終ステップのインテリジェントセンシングシステムでは、知識処理機能が単独にあるのではなく、第一ステップの信号処理、第二ステップの情報処理機能とともに階層構造を構成している。センサ信号の知能処理はまだ開発の段階で、インテリジェントセンシングシステムのマイクロ化はまだ実現していない。

次に、センサ機能のインテリジェント化に対応して、どのように信号処理系が変化していくのか展望する。センサからの電気信号は信号処理されるが、信号の演算、蓄積、データ転送などマイクロコンピュータとシステム化される例が増えつつあり、図1に示すように信号処理係にマイクロプロセッサが導入されることが多い。アナログ出力タイプのセンサ素子が多いので図1にはアナログ信号をデジタル化するA/Dコンバータが示してある。

センサのインテリジェント化はこのようなマイクロコンピュータの利用により始められたが、当初、センサと信号処理系、マイクロプロセッサとが独立していた。その後、より小型化を目指してセンサとマイク

ロプロセッサとの集積化へと発展し始めており、小型で高性能なセンサモジュールの開発努力が続けられている。

一方、マイクロコンピュータの利用により、センサ素子出力の直線性が悪くても、また、履歴現常があったとしても、再現性のある現象であればソフトウェアで補正できるわけで、マイクロプロセッサの導入は信号処理、論理処理だけでなく、センサ素子設計にとっても重要である。

センサのインテリジェント化をセンサ素子部について考えると、単体センサ素子から、アレイ化や他機能素子との複合化、さらには、三次元的な構造をもつマイクロ集積化へと発展すると考えられる。当然、先に述べた信号処理系の集積化もセンサ素子の進展に合わせて進むので、センサのより小型化が実現される。

こうした集積化に伴って、センサ機能は単純な検知から、認識、自己チェック、学習、判断、自己修復等へと飛躍的にインテリジェント化される。当然、それぞれのステップでセンサの高性能化も進むので、より高精度、高信頼性、高感度な高性能センサも利用できようになる。センサ機能のインテリジェント化を実現機能、センサ素子、信号処理回路、について述べてきたが、その概要をセンサ機能の将来動向として表1にまとめた。

表1 センサ機能の将来動向

センサ素子構造	単 体 → 複合・アレイ化 → マイクロ集積化		
	単一構造	複合構造	階層構造
信号処理	信号処理	情報処理	知識処理
	センサ特性の補完	信号の統合と融合	知識獲得と利用
機 能	高性能化	高 機 能 化	知 能 化
	検 知	識別・自己チェック	学習、認識、判断、自己修復

3. センサのインテリジェント化のためのアプローチ

センサの将来動向で述べたようにマイクロ集積化したインテリジェントセンサはまだ実現されておらず、今後の開発を待たなければならないが、センサ素子と信号処理回路の集積化はすでに実用段階に入ってきており、センサの知能化が進み始めている。現時点でのインテリジェントセンサの特徴を挙げれば次のようになる。

- 1) 高機能マイクロセンサ素子である。
- 2) 自己診断が可能である。
- 3) 環境に応じて最適パラメータをセンサ自身で選択可能である。
- 4) センサ自身で分散処理ができ複雑な事象の検出も容易である。

このようなセンサのインテリジェント化のためには、センサ素子からと信号処理からのアプローチが主である。最近では、センサ素子と信号処理回路の集積化も可能となってきたために、センサのインテリジェント化が活発になってきている。

図2にセンサのインテリジェント化のためのこれらのアプローチを示す。センサ素子に関して材料、センサ構造、アクチュエータとの一体化などのアプローチが考えられる。信号処理系では信号処理、情報処理、知識処理、アルゴリズムなどの各アプローチになる。さらに最近では、センサ素子と信号処理系の技術の融合が可能となったために、両者のマイクロ集積化が有力なアプローチになりつつある。マイクロ集積化はセンサ素子の複合化やデバイスの小型化に有効であり、活発な開発が展開されている。

ここでは、エレクトロニックセラミックスによるセンサのインテリジェント化が主題であるため、センサ材料、構造、マイクロ集積化によるセンサのインテリジェント化アプローチに限定して代表的な例を示す。

図2 センサの知能化のためのアプローチ

4. 材料設計によるセンサの高機能化

エレクトロニックセラミックスは種々の機能を持つと同時に耐環境性に優れているため、センサ材料としても有用であり、宇宙から医療、化学プラント、家電に至る広い分野のセンサに適用されている。そのためセラミック材料を用いたセンサの種類は多い。エレクトロニックセラミックスの機能の多様性を示すために、セラミックセンサの代表例を表2に示す¹⁾。

これらのセンサ機能をさらに高機能にするためにはどのような方法があるのだろうか。材料組成や結晶構造の制御も重要であるが、ここでは、材料構造の制御という観点から高機能化のアプローチを示したい。

図3に格子構造の概念図を示す。図3中の(a)は一次元構造であり一般的には積層構造体として実用化されており、(b)は二次元構造、(c)は三次元構造である。こうした格子構造を積極的に利用することによって、いまだ実現できなかった高機能なセンシング機能を作りだそうとする試みである。

まず一次元構造体による高機能化の例を示す。セラミック赤外線センサには強誘電体セラミックスの焦電特性が使われている。強誘電体の自発分極の大きさが温度によって変化することから、赤外線を電荷変化として検知している。この検知能は焦電係数(C/cm²K)

図3 格子構造の概念図

表2 主なセラミックセンサ

検知対象	出力信号	材 料 例	検出原理と応用例
温 度	抵 抗	NiO, FeO, CoO, ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ , MnO-NiO-CoO	キャリア濃度の温度変化(NTC): 温度計, ボロメーク
		半導性BaTiO ₃	PTC 粒界効果: 温度リミッター
		VO ₂ , Y ₂ O ₃	半導体-金属相転移: 温度スイッチ
	磁 化	Mn-Zn, Ni-Zn, Mn-Cuフェライト	強磁性-常磁性相転移: 温度スイッチ
	誘 電 率	BaTiO ₃ , CaTiO ₃ , SrTiO ₃	ϵ_r , の温度変化: 温度計
	起 電 力	Pb(Zr, Ti)O ₃ , PbTiO ₃	焦電効果: 非接触温度計
		安定化ZrO ₂	酸素イオン伝導: 高温温度計
振動ひずみ	起 電 力	BaTiO ₃ , PbTiO ₃ , Pb(Zr, Ti)O ₃	圧電効果: 振動計, 加速度計
音 圧	起 電 力	BaTiO ₃ , Pb(Zr, Ti)O ₃	圧電効果: 超音波センサ
光	起 電 力	BaTiO ₃ , Pb(Zr, Ti)O ₃	焦電効果: 赤外線センサ
	可 視 光	La(Yb, Er)F ₃	反ストークス則: 赤外線センサ
		ZnS	蛍光効果: X線モニタ
		CaF ₂	熱蛍光効果: 線量計
ガ ス	抵 抗	SnO ₂ , In ₂ O ₃ , ZnO, WO ₃ , α -Fe ₂ O ₃ NiO, CoO, Cr ₂ O ₃ , LnNiO ₃ , Ba(Ln)TiO ₃	ガスの吸着による電荷移動: 可燃性ガスセンサ
		Pb/TiO ₂	整流作用: H ₂ , CO, エタノールセンサ
		(Ln, Sr)CoO ₃ , γ -Fe ₂ O ₃ , CoO-MgO, TiO ₂	化学量論組成変化: O ₂ , エタノールセンサ
	起 電 力	安定化ZrO ₂ , ThO ₂ -Y ₂ O ₃	酸素イオン伝導: 自動車排ガスセンサ
湿 度	抵 抗	NiFe ₂ O ₄ , (La, Sr)FeO ₃	水分吸着による電子伝導変化: 湿度計
		TiO ₂ -SnO ₂ , TiO ₂ -Y ₂ O ₃ , TiO ₂ -MgCr ₂ O ₄ , Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂	水分吸着によるイオン伝導変化: 湿度計
	誘 電 率	Al ₂ O ₃	吸湿による ϵ_r , 変化: 湿度計
イオン, 電子	電 流	BaTiO ₃ , ZnTiO ₃	二次電子放出: 二次電子増倍管
溶存イオン	起 電 力	AgX, LaF ₃ , Ag ₂ S, NdF ₃ , PrF ₃ , AgX/Ag ₂ S, MS/Ag ₂ S	イオン濃淡電池: イオン電極

で決まり, 焦電係数は材料定数であるため材質が決まれば任意に設計変更することはできない。もし焦電係数が数倍に上げられれば感度が上がり, 赤外線センサの高機能化が実現できるので解決したい課題である。

ところで, 焦電係数は結晶転移点でピーク値をとり, その結晶転移点は組成によって制御できる。この事実を利用して一次元構造を形成すれば, このアプローチは上記課題解決に大変有効となる。図4に模式的に示すように, 結晶転移点が数度異なるセラミックスを合成してシート状に成形し, それらを重ねて積層状に圧着焼結させるのである。焦電係数の温度依存性を一定に保ちにくい, 厚み方向に組成の傾斜が形成されているので焦電係数のピーク値を生かすことができる。(Pb_{1-x}Ba_x)(SnSbTiZr)O₃系, PbZrO₃-Pb(ZnNb)O₃-PbTiO₃系²⁾について菱面体強誘電体相のLT(F α')-HT(F α)相転移を利用した実験では, 焦電係数は単独組成に比べて数倍にも引き上げられている。

図4 組成傾斜層状構造による焦電セラミックスの焦電係数増大概念図

次に二次元構造体による高機能化の例を, 同じくセラミック赤外線センサについて見てみよう。焦電型赤外線センサは, PbSやHgCdTeなどの量子型赤外線センサに比べ感度は1~2桁低いが常温で動作するので

図5 PTCヒータの自己加熱による定温制御

簡便であり、防犯や防災に広く使われている。従来は点検知であるが、もし面検知が実現すれば赤外画像検知が大変容易になり、赤外線検知のインテリジェント化が飛躍的に進むと思われる。こうしたことから 64×32 , 64×64 二次元構造を持つ赤外線センサの開発が始まっており³⁾, 100×100 の二次元赤外線撮像素子の試作も行われている⁴⁾。しかし二次元構造になると素子数が急増し後段の信号処理回路の大きさが問題となるため、二次元センサになると信号処理回路はIC化され、MOS FETやSi-CCDとセンサ部とを集積化する必要が生じ、後で述べるマイクロ集積化と密接な関係が生じる。

最後の三次元構造はセラミックスの微細構造に特徴的に見られる構造である。この構造を持つ代表的なインテリジェント材料が、PTCサーミスタである。半導体チタン酸バリウム粒子の粒界表面が薄く酸化された構造で、結晶転移点で抵抗値が数桁急増する特異な特性を示す。結晶転移点の近傍温度ではセラミックスが温度を感じて抵抗値を変化させるので、電気ヒータとして用いる例では図5に示すように自己制御機能が実現される。この例では制御回路が完全に省略され、センサ電子部でのインテリジェント化の効果の大きさが理解できよう。

5. デバイス構造によるインテリジェント化

センサ構造に特徴を持たせ、センサ材料単独では実現できない機能を創出することは、インテリジェント化アプローチの中でも重要なアプローチの一つである。このアプローチでは構造上の簡単な工夫によって、驚くべきインテリジェント化が実現される。代表例として次の3例を簡単に紹介したい。

自己診断機能はセンサの信頼性確保のうえから必要性の高い機能である。マイクロコンピュータを使って自己診断機能が一部試みられているが、ソフトウェア開発でコスト高になったり、メモリ量の増大、マイクロコンピュータ自身の故障には無力である等実用化には課題が多い。そこで、まず初めに、すでに紹介し

た焦電型赤外線センサについて簡単な構造設計で自己診断機能を付与した例を示す。

焦電型赤外線センサは検知素子とインピーダンス変換回路を、シリコン窓を持つTO-5ケースに封止した簡単な構造のセンサである。検知素子は赤外線検出感度が高いので、検知素子近傍に微弱発熱体を追加配置するだけでセンサの自己診断機能が実現される。すなわち、微弱制御電流を通して微弱発熱体を発熱させ、検知素子からの同期信号によってセンサ機能が正常に保にれているかどうかを判別できるのである。簡単な構造ではあるが効果の大きい事例である。

次にセラミック二次電子増倍管の例を見てみよう。半導体セラミックスの表面に電子やイオンを衝突させると表面から二次電子が放出される。衝突荷電粒子のエネルギーが $200 \sim 300 \text{ eV}$ の時、放出二次電子は最大となる。入射電子1個当たり放出される二次電子の平均数が2次電子放出係数 δ と定義される。ZnTiO₃系セラミック半導体の δ が約2と大きいことから、このセラミックスを内径約1.2mm、長さ約90mmのスパイラル状に焼結させて、二次電子増倍管が作られている。

図6に示すようにセラミックチューブ両端に電圧を印加するとチューブ内部に電位勾配が形成され、チューブの内部空間に電子増倍機能を付与することができる。たとえば、電圧印加の状態で電子がチューブ内に飛び込み管壁に衝突すると、数個の二次電子がたたき出される。これら放出された電子はチューブ内の電位勾配によって出力端のほうへ加速され、またチューブ内壁に衝突してさらに二次電子をたたき出す。二次電子の放出を伴った衝突がチューブ内で繰り返されるので、出力端に近づくにつれてチューブ内の電子数は急増する。チューブ内で衝突が n 回繰り返されると、出力端では δ^n に増倍された出力信号が検知されることになる。先のZnTiO₃系二次電子増倍管の例では 10^8 のゲインが得られており、電子やイオンの一個を検知することもできるのである¹⁾。

このようにセラミック二次電子増倍管の場合、簡単なチューブ形状が荷電粒子の検出と信号増幅を可能とし、検知と増幅とが一体化されているため高S/N比

図6 セラミック2次電子増倍管の構造と増倍原理

の検知も実現されているのである。デバイス形状によるセンサのインテリジェント化の典型例であろう。

次の圧電振動ジャイロもデバイス形状が新機能実現の決め手となった好例である。圧電セラミックスは加速度や振動検知素子としてよく使われている。この圧電セラミック片を図7に示すように三角柱片に張り合わせて三角形音片型振動子とした共振型振動ジャイロが考案された。振動しているこの振動子の z 軸を中心に角速度が加わると y 軸方向にコリオリ力が生じる。図8に示すように、左右2辺の圧電セラミックスを振動の駆動用とし、残る1辺の圧電セラミックスを帰還用とする自励発信回路が構成されている。検出は左右2辺の駆動用圧電セラミックスが共用され、差動

増幅回路によって駆動振動成分が打ち消されている。そして回転時に同期検波でコリオリ信号のみが抽出され回転角速度に比例した出力信号が得られるのである⁵⁾。

このタイプの圧電振動ジャイロ、ジャイロスター[®]は小型であるにもかかわらず外部振動や衝撃に強く、地球の自転も検出できる高い感度を持っている。こうした特性はこのセンサが持つ特異なデバイス構造によって実現されたものであり、センサ開発における構造設計の重要性を示す一例である。ジャイロスター[®]の優れた特性のために、すでにVTRカメラの手振れ補正やカーナビゲーションの角度センサとして普及し始めている。

6. マイクロ集積化によるインテリジェント化

センサ素子をマイクロ化し、マイクロプロセッサとシリコンマイクロマシーニングにより作られるマイクロ構造体⁶⁾とを集積化して、マイクロで賢いセンシングシステムを創造しようとする研究開発が最近活発化し始めている。センシング材料は、セラミックバルクに代えてイオン工学によってSi基板上に形成されたセラミック薄膜であり、マイクロマシーニング技術によって作られるマイクロ構造体と一体化される。最近ではマイクロマシーニング技術が進み、異方性エッチングによるバルクシリコンの微細加工から

図7 正3角形圧電振動ジャイロ

図8 三角形圧電振動ジャイロの検出回路構成

図9 技術の融合による新機能の創造

CMOS技術を利用した表面微細加工技術へと加工技術の幅が拡大しつつあり、CMOS技術によるマイクロマシーニングによってもセンサ素子のマイクロ化が実現され始めている⁷⁾。

また、シリコン基板には信号処理回路も形成できるので、センサの高度なインテリジェント化をはかることができる。図9に示すように技術の融合による新機能の創造であり、材料物性の観点からもセラミックをマイクロ化すればどのような機能が現れるのか興味のあるところでもある。

材料のマイクロ化のアプローチの関心は高く、マイクロ化によってバルク状態では得られないエレクトロニックセラミックスの材料物性が報告され始めている。例えば、ガス検知材料で代表的な SnO_2 の超微粉化によるガス感度実験では、 CO や H_2 ガスに対するガス感度が10nm以下の粒子径になると増大しはじめ、5nm付近で数倍～1桁も大きくなると報告されている⁸⁾。これは、半導体の内部電子が超微粒子ではほとんどが表面電子になり表面ガス活性が増大したためと考えられている。

また、セラミック薄膜を原子オーダーで制御してセラミック原子層超格子を構築する試み、例えば、高温超伝導体や $\text{SrVO}_3/\text{SrTiO}_3$ 超格子などが注目されている⁹⁾。特に高温超伝導体は CuO_2 層状構造をもち量子機能デバイスとしての実用化の可能性も大きい。原子層オーダーでの超格子制御が実現すると、電磁気特性に量子サイズ効果が重畳する可能性もあって新機能実現の可能性も高く、研究開発の重要性は今後高まるものと思われる。一方量子効果の現れない通常の薄膜の実用化は活発であり、 ZnO 、 PZT 、 BaTiO_3 、 Al_2O_3 、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ などの酸化物、 TiN 、 TaN 、 AlN 、 Si_3N_4 などの窒化物、 TiC 、 TaC 、 SiC 、ダイヤモンドなどの炭化物など実用化の試みは多い。これら薄膜材料の中で ZnO 薄膜は、比較的低温で容易にc軸配向して圧電特性を生じるため、マイクロ集積化センサへの応用が活発である。マイクロ化の具体例を以下に述べる。

超音波センサは物体検出、金属探傷、魚群探知、医療用超音波診断など広く使われているが、小型化による用途拡大を目指して超音波センサのマイクロ化、インテリジェント化が圧電性薄膜を用いて進みつつある。

シリコンマイクロマシーニングにより Si ダイアフラム構造を作り、この上に ZnO 薄膜を形成し増幅回路と一体化したマイクロフォンが試作されている¹⁰⁾。 ZnO 膜を SiO_2 でコートして電荷のリークを抑え、0.5Hzの低周波まで感度が得られている。ダイアフラムの寸法は直径3mm、厚さ30 μm 、 ZnO の厚さは5 μm 、チップサイズ6mmの小型化が実現され、音圧2 μbar の時、感度25 $\mu\text{V}/\mu\text{bar}$ 、 S/N 比5:1、応答周波数0.1Hz～10kHz、消費電力40 μW の諸特性が得られている。

図10に ZnO 薄膜マイクロフォンの他の例を示す。LPCVD法で形成した厚さ2 μm の Si_3N_4 ダイアフラムの上に0.5 μm の ZnO が形成され、CMOS回路との一体化が検討されている。感度もオーディオ周波数域で100～200 $\mu\text{V}/\mu\text{bar}$ 、16kHzの共振周波数で2mV/ μbar 、 S/N 比は入力1 μbar で15であり、良好な特性が実現されている¹¹⁾。

圧電性 ZnO 薄膜を用いてシリコン基板上にSAW

図10 ZnO 薄膜マイクロフォン

a) Single Delay Line 方式

b) Dual Delay Line 方式

図11 SAWセンサの基本構成

(表面弾性波)デバイスを構成したセンサも活発に研究されている。SAWセンサの方式には、図11に示すようにSingle Delay Line方式と、Dual Delay Line方式がある¹²⁾。

Single Delay Line 方式では、表面弾性波の伝ぱんによる遅延線と帰還増幅器で発信回路を形成する。伝ぱん路の表面に接する気体、液体、固体によって表面波の振幅および伝ぱん速度が変化する。通常、伝ぱん速度の変化を発振周波数の変化として検出する。

Dual Delay Line 方式では、発振回路を2個形成し一方を検出回路に、他方を参照回路としている。両者の発振周波数の差を検出することにより、両回路が等しく受ける周囲環境の変化やドリフトが補償され、精度の良い測定ができる。

SAWセンサの測定対象は電圧、圧力、加速度、磁気、ガス、湿度、水など広範囲であり、出力は発振周波数の変化でデジタルであって、非常に高感度でppmレベルの検知も可能である。また、デジタル信号であるため信号処理も容易であり、信号処理回路を集積化した知能化の研究が進みつつある。

7. おわりに

エレクトロニックセラミックスによるセンサのイ

ンテリジェント化について、材料、デバイス構造、マイクロ集積化の主としてハード面の視点からそれぞれの事例を基に解説した。当然、センサのインテリジェント化には信号情報処理アルゴリズム、情報圧縮技術等ソフト面からのアプローチも重要であるが紙面の都合で省略したため、ハード面の3つのアプローチに限定した内容となった。また、視点がデバイス寄りになったためにセラミック材料の掘り下げが不十分になってしまったが、インテリジェント化には種々のアプローチがあり、解説したアプローチの概要と現状の技術水準を理解していただければ幸いである。

今後センサのインテリジェント化を進めるにはマイクロプロセッサをはじめとするLSI半導体デバイスの利用が不可欠である。そのため半導体デバイスと一体化しやすい、マイクロマシーニングと薄膜技術の融合によるマイクロ集積化のアプローチは、今後益々重要になる。エレクトロニックセラミックスのマイクロ化による新機能やデバイス構造によるインテリジェント化をマイクロ集積化に生かせば、今後センサのインテリジェント化が大いに期待できるだろう。

引用文献

- 1) 村田充弘, 脇野喜久男: 材料, 33, 617(1984)
- 2) Takenaka T., H. Komiya and K. Sakata: *Proc. ISAF-90*(1990)
- 3) Togami Y., M. Okuyama, Y. Hamakawa, M. Kimata and M. Denda: *Optoelectronics*, 6, 205(1991)
- 4) Watton R., et al.: *S. P. I. E. A588*, paper 14(1985)
- 5) 中村武: センサ技術, 10, 65(1990)
- 6) 電気学会: “最近のセンサ”, p.1, 電気学会(1988)
- 7) Baltes H.: *Sensors and Actuators*, A37-38, 51(1993)
- 8) 山添昇: 一本金属学会報, 29, 627(1990)
- 9) 吉本護: 化学と工業, 46, 190(1993)
- 10) Royer M., et al.: *Sensors and Actuators*, 4, 357(1983)
- 11) Kim E. S., J. R. Kim and R. S. Muller: *Proc. of Transducer 91*, 270(1991)
- 12) Damico A. and E. Verona: *Sensors and Actuators*, 17, 55(1989)