金属系アクチュエータ・センサ材料の研究開発 —急冷固化マルチフェロイックスへの新展開—

古屋 泰文*・岡崎 禎子*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 55, No. 5 (2005), pp. 233-241

Recent research of metallic actuator/sensor materials —New aspect of multi-ferroics—

Yasubumi FURUYA* and Teiko OKAZAKI*

Keywords: multi-ferroics, sensor/actuator, smart/intelligent materials, smart composite, multi-functional devices

1. はじめに

機械構造システムの多機能化, 省エネルギー, 環境能動応答・知能ロボット化や生体医療工学, IT・ユビキタス社会分野は, 次世代の産業育成上の重要な技術領域としてと捉えられ, 近年, 内外でそれらの知的(スマート・インテリジェント)化技術に関する研究開発がなされている。知的材料システム(Smart/Intelligent Material System)とは, 基本的に, センサ・コントローラ・アクチュエータ(エフェクタ)一体化制御機能を有するシステムであり, 材料側からのアプローチとしては, まず, そこに不可欠な基盤技術要素となる高性能, 複合機能そして能動応答(Active)機能を有するアクチュエータ・センサ材料の開発が要求されてくる。図1には, その主な候補としてのアクチュエータ・センサ機能両方を有する知能化要素材料とそれら機能発現における相互エネルギー変換に密接に関係する結晶相変態(Phase

Transformation)を模式的に示した¹⁾。また, 図2には, このようなアクチュエータ・センサ機能材料への, 各種物理的・化学的諸量間での相互変換(インプットとアウトプット)に関するパラメータの関係を示した²⁾。図中, 表の対角線上は材料物性値, 一点鎖線(影部)内の特性はセンサ機能, 実線で囲まれた特性はアクチュエータ機能を示す。このように多くのアクチュエータ(エフェクタ)材料とセンサ材料は, 機能的には表裏一体のものであり, この特性をフルに利用し統合・融合化すれば, 小型で多機能な知的(スマート・インテリジェント)材料システムが設計・実現できることがわかる。

ここでは, まず, 代表的固体アクチュエータ・センサ要素材(形状記憶, 超弾性, 磁歪, 圧電等)である相変態型フェロイックス(Ferroic 材料)*¹の高性能化のためのナノ・メゾ〜マイクロ組織制御による材料設計・プロセス技術を紹介する。さらに, これまで各々個別に扱われてきた, 固体相変態型フェロイックス系(磁歪, 形状記憶合金, 圧電等)アクチュエータ・センサ材料の機能(図1, 図2参照)を, 同一材料内で融合化または積層・複合化することで, より小型軽量で新機能発現性をも生み出すことができる新たな機能材料群(=マルチフェロイックス, Multi-ferroics)(図3参照)の研究も最近開始されているので, その研究事例を紹介し, 今後の応用分野も含む研究開発方向を展望してみる。

2. 知能化要素材料の研究開発

固体アクチュエータ・センサ材料について, 液体急冷凝固法, 蒸着薄膜プロセス法など材料製造を工夫して, その機能発現に直接的に関連する結晶相変態(機械物理的エネルギー変換)挙動制御という観点からナノ〜メゾ〜マイクロ微細組織

図1 知的材料構造システムの基盤となる, 各種アクチュエータ・センサ材料とその相変態メカニズム模式図¹⁾

*1 材料の物理的性質(電気, 磁気, 弾性など)が, 外部からのエネルギー付与により, その材料内の微視的な同一の微小領域(ドメイン=Domain)構造の発生, 成長・増大, 消滅メカニズムによって機能を発現する機能性材料群の総称である。強磁性体, 強誘電体, 強(超)弾性体などがよく知られている。

VARIOUS PHENOMENA IN MATERIALS

INPUT → MATERIAL DEVICE → OUTPUT						
OUTPUT INPUT	CHARGE CURRENT	MAGNET- IZATION	STRAIN	TEMPERATURE	LIGHT	
ELEC. FIELD	Permittivity Conductivity	Elect.-mag. effect	Converse piezo-effect	Elec. caloric effect	Elec.-optic effect	
MAG. FIELD	Mag.-elect. effect	Permeability	Magneto- striction	Mag. caloric effect	Mag. optic effect	
STRESS	Piezoelectric effect	Piezomag. effect	Elastic constant	—	Photoelastic effect	
HEAT	Pyroelectric effect	—	Thermal expansion	Specific heat	—	
LIGHT	Photovoltaic effect	—	Photostriction	—	Refractive index	

Diagonal Coupling = Smart Material

Off-diagonal Coupling = Sensor Actuator

図2 機能材料の各種特性 (アクチュエータ・センサ材料群)²⁾

図3 フェロイック材料からマルチフェロイックス材料への新展開と3大固体要素材料(強誘電, 強磁性, 強弾性体)での重なり合い相関図

(ドメイン形態, 結晶方位, 大きさ)を最適化制御し, 高機能・新機能(高速応答, 大変位・高出力, 多機能)を有する要素材料開発を行う材料物性工学的なアプローチが基礎となる。図4には, 筆者がこれまでの経験からまとめた新素材開発への一般4原則を示す。ここでは, この基本則に従って行われてきた筆者らの高機能・新機能金属系アクチュエータ・センサ材料の設計と研究開発事例を紹介する。

2.1 急凝固組織(非平衡相・ナノ組織)化による高性能フェロイック系素材の開発

フェロイック金属系アクチュエータ・センサ要素材(形状記憶, 磁性形状記憶, 磁歪合金)特性の極めて敏感な組成依存性を予想するための一つのツールとして, 組合せ法(Combinatory)迅速化成分解析(図5参照)³⁾が有効である。固体相変態時には, 材料物性が同じ局所的な微細組織(Domain)域が発生・合体・移動する機構(メカニズム)で, アクチュエータ・センサ機能(結晶相変態=機械物理的エネルギー変換)が発現される(図1右部参照)。そこでは,

Basic Principles to Design and Development of New Functional Materials

- 1) Observe and Control of an Outermost Electron Orbit (Valence Electron, Spin) → Search a New Alloy and Composition
- 2) Morphology Control of Atomic Arrangement(Cluster, Nano-order Defects) → New Function Discovery-Amorphous, Lattice Ordering by Heat-treatment Effect
- 3) Control of Crystal Interface Characteristics → Material Process Design for Crystal Anisotropy, Nano-scale, Fine Crystallization
- 4) Composite and Device Design → Functional Systematization / Concurrent Design and Manufacture Process for High Performance and Multi-functionalization

図4 新機能性材料の設計・制御基本則

Combinatorial Element Analysis & Property Prediction

図5 敏感な組成依存性を予想するためのコンビナトリアル(Combinatory)組合せ迅速化成分解析事例³⁾

結晶化形態(寸法, 粒界(界面性格分布), 方位など)が大きな影響を及ぼすので, その最適化制御法として, 液体急凝固法が有効な手段となる(図6参照)。特に, ロール回転

Rapid-solidification Technique to Control Microstructures

図6 液体急凝固法による非平衡組織形成（左）と急冷速度変化に伴う結晶組織変化模式図（右）^{6),7)}

速度を調整して、急凝固速度 $=10^4 \sim 10^6 \text{ K/s}$ とすることで、柱状結晶～ナノ結晶～非晶質（アモルファス）ランダム原子構造が得られること、さらに、これらは溶湯状態や高温相から急激に凝固したために、通常の方法では得られない“非平衡相”が出現することで、ユニークで大幅な特性向上や新素材開発が可能になる。急冷薄帯・細線材の物性・組織構造解析を進め、高機能化のための材料組織設計と最適な熱処理条件を調査し、従来は困難視されていた、Cu=8at% 以上での TiNiCu 三元系合金の高性能（狭い変態温度範囲 10°C 以下、歪増加、延性あり）薄板材料の開発に成功した（図7参照）。そして、Ti 過剰超急冷 TiNiCu 形状記憶合金薄帯（リボン）で、アモルファス・ナノ結晶中に析出分散相を形成させて、引張強さ $=1000 \text{ MPa}$ 以上の狭い変態温度幅を両立させた^{4)~6)}。また、あらたな鉄基の加工性を有する FeGa（Galfenol）磁歪材料でも〈100〉方向に結晶異方性をたかめた急冷微細柱状結晶により、従来の溶解・加工法によるランダム方位結晶の場合よりも3倍以上の大きな磁歪が実証された⁷⁾（図8参照）。以上より、液体急凝固法による結晶組織制御（非平衡相、大きな、方位など）が高性能フェロイック系素材の開発に極めて有効な手段であることがわかる。

2.2 急冷素材のバルク固化プロセスの研究開発

さらにこのような高性能急冷素材（非平衡相・ナノ組織）をできるだけ維持したまま、そして、実用的応用範囲の広い新素材を得るために、それら急冷素材を積層・混合して、短時間・低温側放電焼結・接合（SPSJ）法によるバルク化する創製プロセスを提案して研究開発した（図9参照）。主な成果として、図10に見られるような硬さの大幅な上昇に見られる超急冷 Ti 過剰アモルファス・ナノ析出強化高性能形状記憶合金共同開発⁸⁾、鉄基新磁歪急冷合金 FeGa 系⁷⁾（図11参照）などの事例を示す。後者では、急凝固法での〈100〉結晶異方性を維持した薄帯を積層したままバルク固化し、高剛性・加工可能な、従来の希土系 Terfenol-D よりも大幅に安価な新 FeGa（Galfenol）磁歪バルク型合金の創製に内外はじめて成功し、ほぼ実用的な磁歪量（200 ppm）を達成した⁶⁾。

このように、急冷非平衡相、高機能素材特長を生かしたままの大型（バルク状態）で強固（ロバスト）な高性能新構造・機能材料生産が可能になれば、比強度・耐熱性が要求される航空機や発電所、自動車部品、さらには、知能化機械シ

図7 急冷 $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{10}$ (at%) 三元系合金での変態歪～温度特性の向上効果⁴⁾

ステム（ロボット、OA 自動化機器、医療福祉材料）など幅広い応用が拓かれて、先進技術優位性の確保と産業界へのインパクトは非常に大きい。

2.3 マルチフェロイックスの研究開発～ナノ構造設計からの新展開～

固体変態型フェロイックス（形状記憶、超弾性、磁歪、圧電等）をベースにして、複合化プロセス（複合バルク化、薄膜積層化）により多機能化させたマルチフェロイックス効果・材料群（Multi-Ferroic Effect, MFE）への基礎研究は、従来の単体の場合よりもずっと低エネルギーで駆動可能な新たなアクチュエータ・センサ材料創製のアプローチとして注目されている。特に、それらをナノ・メゾスケールで組織制御させた非平衡型急冷バルク固化材料やナノ・ヘテロ積層膜アクチュエータ材料では、その結晶やドメイン形態（寸法、構造、相互干渉効果）などが溶解加工プロセスでの平衡相バルク材料とは大きく異なっており、材料科学的課題や大幅な特性向上が期待できること、および、その延長線上にある複合機能型デバイス化設計への工学的研究例や技術課題について報告する。

(1) 磁気駆動型形状記憶合金（Ferromagnetic SMA）

磁場で早い駆動ができ、かつ、大きな変形が得られる可能性のある磁性形状記憶合金（Ferromagnetic-SMA）が注目を浴びている。それは、従来の磁歪材料での磁区（Magnetic Domain）回転によるメカニズムとは異なり、磁気エネルギー

図8 急冷凝固結晶方位制御された鉄基 FeGa (Galfenol) で見られた磁歪の大きな磁化方位依存性⁷⁾

図9 急冷高性能素材から出発し、放電焼結、磁場中熱処理を含むバルク固化プロセスの流れ提案⁶⁾

付与で形状記憶合金と同じ相変態（マルテンサイト双晶）を誘起するからである（図12参照）。すでに、ホイスラー型 NiMnGa 単結晶（2000年）（図13参照）⁹⁾、多結晶鉄基 FePd 合金系急冷ナノ～マイクロ双結晶化薄帯板（1998年）（図14参照）^{10),11)}などで大きな磁歪発見がなされている。FSMAは大変形の可能性はあるが、その出力（力）はマルテンサイト双晶の再配列が主因ゆえに大きくはない傾向がある。以上より、磁性形状記憶合金は、従来型の感温型に比べて磁気で駆動するので、はるかに高速なアクチュエータ応答性の可能性があり、また、非接触型で体外磁場から駆動できる特徴・利点もあるので、内視鏡先端部把持具やその他血管、管腔部へのアクチュエータ適用なども考えられる。

(2) 薄膜型アクチュエータ・センサ材の開発

マグネトロン・スパッタ薄膜化装置を用いて、形状記憶（SMA）・超弾性合金（SE）系、および磁性形状記憶や鉄基

磁歪 FeX（X= Pd, Pt, Co, Ga, Tb, GaAl, Be 等）合金系要素材の研究開発がなされている。また、以上の要素材料情報から、ナノ～メゾオーダー域で、ヘテロ構造を有し、磁気結晶異方性を高めて、磁区（Magnetic-Domain）形態を揃えて、磁区発生や回転移動を大幅に促進させるメカニズムによる、複合機能、応力誘起・自己変位拡大型積層型磁歪薄膜・デバイス化設計・試作が試みられている。また、強磁性強誘電体（ $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-BaTiO}_3$ など）の探索なども進められている¹²⁾。図15は、強磁性（FeCo）と超磁歪（TbFe）ナノ積層膜での超高感度磁歪アクチュエータ・センサ材料設計・実証事例である¹³⁾。FeCo 側からの磁場誘起効果による TbFe 磁区構造改質により、従来のアプローチである単一 TbFe ナノ結晶やアモルファス組織よりもはるかに低磁場感受性が向上し、顕著なマルチフェロイックス効果（MFE）が現れた。これにより、極低磁場（ $\leq 200\text{ Oe}$ ）駆動が可能な、磁気高速応答可能

Nano-Microstructure Control for Super-cooled Amorphous Ti-rich TiNiCu alloy and their Bulky Process by SPS

NIMS—Hiroaki—IMR(Tohoku)

図 10 超急冷ナノ結晶バルク固化 Ti 過剰 TiNiCu 合金の開発と特性⁸⁾

Post-annealing (1173K·1h) Effect for Fe₈₃Ga₁₇

図 11 急冷 FeGa 磁歪合金リボンの積層バルク固化材料の開発と特性⁷⁾

なマイクロデバイス（駆動素子）を開発中である¹⁴⁾。

同様な観点から、磁気弾性（磁歪）と強弾性（TiNi 系）や圧電効果組合せ系でのナノ・ヘテロ積層複合化により、圧電材料に磁歪応力を与えて、外部磁場や応力、温度などをより敏感に検知できる、PZT ベースのマルチフェロイックス系多機能センサ材料・デバイス開発も可能になるであろう¹⁵⁾。

前出 (2.2) の超急冷材料（薄板、バルク固化）でも、平衡相・ナノ・メゾ析出効果による形状記憶合金や磁歪材料系での大幅な特性向上が明らかになってきており、それらのマルチフェロイックス材料群への多機能化・高性能化への原子・電子論を含むナノ構造メカニズムからの基礎的材料科学研究の新展開が大いに期待できる。また、その工学的応用も高性能化、小型・集積化、知能化アクチュエータ・センサやデバイス設計・開発を促進できるであろう。

3. 知的材料システムの研究展開

実用可能な大きさ（バルク化）や多層構造の複合機能材料（Multi-ferroics）群の開発・作製技術を基にして、その応用・実用化展開として、大型固体アクチュエータ、小型薄膜センサさらには両者の機能を融合させた知的機能素子（スマート・デバイス）を設計・開発できる。この際には、各々の固体アクチュエータ・センサの機能特性と適用限界（発生応力・歪量、周波数特性、駆動エネルギー供給レベルとその方法、耐環境特性、信頼性など）を十分考慮して、デバイス設計・適用試験に注意が要る。そして、これらを用いることで、先進的生体医療用材料、スマート複合材料設計やワイヤレスセンシング用 SAW デバイスにその手法を拡大・適用できる。

3.1 生体医療材料・デバイス分野の応用展開

(1) 内視鏡先端小型アクチュエータ・デバイス開発

温度と磁気に両方応答できる特徴を有する、磁性形状記憶合金 (FSMA) を利用した。2本もしくは3本の FSMA 足部におおのの電極 (通電) を接続, 各 FSMA を閉じた爪 (把持) 状態に記憶熱処理した。通電加熱により SMA は, 回復力と剛性 (硬さ) が発生して閉じるが, 通電中止で SMA は冷却されて, それぞれの爪に対して円筒管外部に設置した永久磁石のバイアス引力が勝り, 把持爪は開く機構を設けた。磁石による静磁場吸引力をバイアス (逆方向) 力として, TiNi 感温型形状記憶合金把持器具 (長さ 2cm, 幅 5mm, 板厚 0.15mm) を試作した。0.2A, 1.5V (乾電池一本程度) 電力で, 小物体 (10g 程度) クリップ機能 (ON-OFF) を実験で確認できた^{6),16)}。

(2) 自家骨再生デバイス

さらに, 自家骨再生/歯科医療分野での知的材料・デバイスの応用も大いに期待される。骨継ぎ部分への形状記憶合金 (TSMA) の圧縮固定プレート設置と骨圧電 (ピエゾ) 効果発生による骨再生・修復促進作用事例, 歯科領域での SMA 超弾性効果を利用した自家骨再生補助デバイスや骨成長誘導因

図 12 感温型形状記憶合金と磁性形状記憶合金の特徴比較と多機能化 (マルチフェロイックス効果) アクチュエータ・センサ材料開発

子を含むバイオセラミックスとの多層・傾斜機能構造の人工歯根設計・開発 (図 16 参照) などが進められている。その中で非 Ni アレルギー性新形状記憶・超弾性合金 (TiMoNb, TiAl 系等) 開発での変形能や比強度, 高強度/靱性向上, 小型化強度保持設計・作製プロセスなど新たな生体医療用機械材料として再注目されてきている。

Shape memory alloy displaying ferromagnetic properties: Fe-29.6at%Pd (Furuya et al., 1998) Ni-Mn-Ga (Murray et al., 2000). Rearrangement of the variant structure of a twinned martensite through the motion of twin boundaries to accommodate the applied field can yield 5.5% percent strain

図 13 マルチフェロイックス磁性形状記憶合金の特徴と磁歪発現メカニズム⁹⁾

図 14 鉄基磁性形状記憶 FePd 合金の室温付近での 2 段階相変態状態図 (左図) と急冷薄帯板 (リボン) の磁歪の温度依存性 (右図)¹¹⁾

図 15 磁歪系ナノ・ヘテロ積層膜でのマルチフェロイックス効果 (極低磁場での磁歪感度向上効果事例)^{13),15)}

3.2 知的（スマート）複合材料の設計・開発

三元材料要素（感温型および磁性型形状記憶合金とアルミニウム合金マトリックス）を有する大型バルク複合材料（SMA/FSMA/Al マトリックス系積層型コンポジット、図 17 参照）の設計を行い、その作製プロセス条件把握とそのスマート複合材料としての機能特性を調査した。アルミニウム合金マトリックス内に感温型 TiNi 形状記憶合金（TSMA）ファイバを埋込み、その表層部には、FePd, CoNiGa 等の磁性形状記憶合金（FSMA）薄膜を形成させる。この埋込み要素材料の二重構造化により、たとえば、航空機翼や胴体への表面衝撃損傷（鳥や工具の衝突ミス）や内部構造剥離（クラック・損傷）の発生を FSMA の応力誘起型相変態を通して表層部に接した磁気センサで検出し、かつ、その部分のゆがみ（残留変形）や内部損傷を埋込んだ TSMA の形状回復力である程度自己修復できる知的（アクチュエータ・センサー一体複合化）機能が期待される^{17),18)}。

3.3 多機能・複合機能型 SAW センサデバイス設計・開発

多チャンネルマグネトロンスパッタ法を用いて、圧電薄板状に磁歪や超弾性薄膜を積層させて、それらの結晶組織制御

も行い、多重構造化した表面弾性波（Surface Acoustic Wave, 以下 SAW）デバイスセンサの研究をした（図 18 参照）。SAW デバイスは小型化、高機能化を実現するための共振現象を利用した移動体通信端末送受信電波制御（フィルタ）用キーパーツの一つで、圧電性基板材料とその上に焼付けた楕円電極（IDT）で構成され、フォトリソグラフィ微細加工等により数 GHz 帯で実用化されている。筆者らは、SAW デバイス上を伝播する高周波表面弾性波の性質が、そのまわりの環境変化を受けて変性し、その信号を IDT で受信・抽出することで、逆に、環境センサとしての応用の可能性を検証した。まず、多チャンネル PZT 系 SAW センサデバイスの基本的構造の設計・試作を行い、さらに、SAW 伝搬経路に相変態機能を有する磁性形状記憶材料の薄膜を成膜し、温度変化、応力負荷による SAW の伝搬特性の変化、および、応力、熱誘起相変態による SAW 信号への影響を調べ、その音弾性表面波の振幅（強度）や位相変化を捉えることができ、多機能化環境センシングデバイスとしての機能を検証できた²⁰⁾。

4. ま と め

(1) ナノテクと知能化技術の融合

21 世紀を迎えた先進各国は、次の産業経済の展開（糸口）

図 16 急冷バルク固化プロセス技術による自家骨再生機能を付与した高性能生体医療材料の開発・機能評価¹⁹⁾

図 18 圧電（PZT）基板上に環境応答機能膜を生膜させた多チャンネル・多機能化、ワイヤレス SAW センサとのネットワークシステム概念図²⁰⁾

図 17 応力誘起型双晶による磁壁ピン止め効果によるバルクハウゼンノイズ（BHN）発生とそれを用いた損傷検知・修復機能を組込んだ磁性形状記憶合金繊維強化スマートコンポジットボード^{17),18)}

を、新エネルギーシステム、バイオ（生体医療）、IT（情報通信）、環境・リサイクル技術革新に求めて研究開発を推進している。その中で特に重要視されている分野が、もっと極微小域（原子・分子）まで立ち入ったナノ・テクノロジーを駆使した新機能物質・材料開発の基盤的インパクトによる飛躍的な技術革新へのアプローチであるといえる。

材料分析および合成プロセス技術が、数～数十原子（ 10^{-9} m オーダ）まで入手できたので、ナノテクノロジー関連研究が、この数年で一躍世界的に活性化されてきた。しかし、いまだ、この極限的微小領域では、たとえば従来からのように人工的な複合材料化設計発想から、自由自在の積層・分散構造制御、そこからの力学的特性取出し手段などはまだまだ先の未開の話であり、事実、内外で行われているナノテク材料開発は、分子・原子レベルの自己組織化（Self-Assembly）、いわば、化学的反応を主に利用した材料設計・評価に主眼を置いている研究・基礎技術であることに、一般研究者・技術者は注意すべきであると考え。換言すれば、現在、活発なナノテク関連技術へのアプローチは、依然かなり曖昧な部分も多く、目標までの研究実用化・開発プロセスのまだ見えない（つかめない）材料システムに向かっての、物理化学的反應ベースのボトムアップ（bottom-up）方式の研究レベルであり、早晚、その具体的成果と応用展開へのギャップ（研究成果の非効率化問題）が出てくる可能性が大きい。それを避けて若手研究者の隘路を防ぎ、研究意欲やその成果を実感させるためにも、その技術的意義と実用化への展開をより明確化させながら、材料ナノ・マイクロ設計・評価～複合化・デバイス～制御システム組込み～構造設計という、一連の連携的材料協調設計～コンカレントマテリアル・エンジニアリング～研究開発体制を維持することが大切である。いわゆるトップ・ダウン式（Top-down, 垂直的技術展開）の要素技術のアセンブリ系複合・統合化（Composites）手法～いわゆる、ここで最初に述べた“知的なスマート材料システム化設計・開発手法”が生かされることになるわけであり、この知能化技術分野の時代的重要性はナノテクとも絡み合ってますます高まっていくであろうことが容易に想像される（図19参照）^{21), 22)}。

(2) わが国での材料研究戦略（次世代マン・マテリアルインターフェース）

そして、ここで注意すべきは、今後のわが国での材料関連の主要ビジネスとしては、(1) 生活利便性、健康維持、安全・安心社会などに関するものが多く、われわれの日々の生活に身近な関連技術開発が要求される時代に至ってきていること、(2) 従来のハードな重厚長大産業が牽引する生産物対象から、生活・環境変化に臨機応変に対応できる柔軟（ソフト）で移動体（モバイル）性のある小型・分散的型技術製品分野が工業経済に占める割合が増大していること、そのような高機能・多機能デバイス型技術製品は、材料特性の機能を使用環境条件に対応して最大限に発揮するためのアプローチともからまって、(3) 高機能・多機能型新素材と集積・微細（ナノ・マイクロ）加工プロセス（傾斜機能材料、多孔質化やデバイス化加工処理（表面研磨性状、内部凹凸微細加工等）の組合せがベースとなっはじめて実現できること、等である。すなわち、これからの主要な産業技術は、みずから環境・状況変化に応答できて、最小のエネルギー消費で、か

図19 ナノテクとスマート化研究・技術の融合化の重要性（ナノ～メゾ機能発現要素領域によるさらなる高次インテリジェント・生体模擬設計研究展開^{21), 22)}）

つ、長期にわたり安全性を維持しながら、我々も親しみやすく身近な“ヒューマンフレンドリー”的存在が目標となろう。事実、筆者らも、ここで紹介した金属系アクチュエータ・センサ材料の研究開発を進めてきているが、使用者（応用）側、たとえば、生体医療分野（医療従事者）や企業研究所の先端電子デバイスとの共同研究打合せでは、材料の要素機能をもとに機能複合化・組合せ設計・集積化微細加工プロセスの可否、その安全信頼性など、さらに厳しい使用条件や外界への応答機能を組み入れた材料設計・開発＝“使われてこそ材料研究”の命題²³⁾に突き当たることが多い。そこに材料研究開発のつぎのテーマや学術・工学両面での発展や材料関係学会での産学連携型の議論（研究会）や研究開発分野拡大への方向性が視える。

謝辞

Dr. V. Varadan (PSU/USA), Dr. K. Uchino (PSU/USA), Dr. I. Takeuchi (UMD/USA), Dr. E. Quandt (Caesar/Germany), Dr. V. Giurgiutiu (USC/USA), 野村 徹教授（芝浦工大）、斉藤千尋研究員（㈱モリテックス）、柿沢忠弘研究員（竹中工務店 ㈱・技研）久保田健君（現：東北大学大学院博士課程）からの関連研究資料提供に感謝します。

参考文献

- 1) 古屋泰文：まてりあ, **41** (2002), 170–173.
- 2) K. Uchino: “Ferroelectric Devices”, Table-1.1 (P.1), Marcel Dekker Inc., (2000).
- 3) O. O. Famou, J. H. Simpers, M. Aronova, K. S. Chang, M. Murakami, M. Wuttig, T. Okazaki, Y. Furuya, L. A. Knauss, L. A. Bendersky, F. S. Biancianiello and I. Takeuchi: Mater. Trans., **45** (2004), 173–177.
- 4) Y. Furuya, M. Matsumoto, H. Kimura, K. Aoki and T. Masumoto: Mater. Trans., JIM, **31** (1990), 504–508.
- 5) M. Yokoyama, Y. Furuya, Y. Shinya, T. Okazaki, S. Kajiwara, T. Kikuchi, K. Ogawa, H. Kimura and A. Inoue: Proc. ISMANAM-2004 (Aug, 2004, Sendai), in printing.
- 6) Y. Furuya and T. Okazaki: Material Technology, 19-2, June (2004), 101–108, (特許出願：PCT/JP 2004/14963).
- 7) C. Saito, Y. Furuya, T. Okazaki, T. Matuzaki and T. Watanabe: Mater. Trans., **45** (2004), 193–198.
- 8) 横山雅紀, 古屋泰文, 梶原節夫, 小川一行, 木村久道, 井上明

- 久：日本機械学会講演論文集，No. 04-05 (2004)，pp. 21-22.
- 9) V. Giurgiutiu: MRS-2004 Fall Meeting "Smart materials and Structures" Lecture (Boston, 2004).
  - 10) Y. Furuya, N. W. Hagood, H. Kimura and T. Watanabe: Trans. JIM, **39**-12 (1998), 128-133.
  - 11) T. Kubota, T. Okazaki, H. Kimura, T. Watanabe, M. Wuttig and Y. Furuya: J. Science and Technology of Advanced Materials, **2** (2002), 201-207.
  - 12) 加島 篤，中村優哉，井上光輝，藤井壽崇：日本応用磁気学会誌，**25** (2001)，875-878.
  - 13) E. Quant, A. Ludwig *et al.*: Proc. Actuator-2003, Lecture (Bremen, June, 2003).
  - 14) 渡辺 悟，岡西紀昌，岡崎禎子，道上宗巳，板垣喜一：日本金属学会秋期大会概要集，(2004，秋田)，p. 278, No. #105.
  - 15) K. Uchino: ICAT/JTTAS 52th Inter. Symp. Lecture (Tokyo, June 2004).
  - 16) 古屋泰文ほか：2003 年度地域コンソーシアム研究開発事業「全方位診断スマートカテーテルの研究開発」成果報告書，pp. 107-116.
  - 17) Y. Furuya, S. Tamoto, T. Kubota and T. Okazaki: Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering Society), Vol. 4699 (2002), pp. 365-373.
  - 18) 古屋泰文，N. W. Hagood，田本静香，久保田健，岡崎禎子：日本金属学会誌，**66** (2002)，28-33.
  - 19) 古屋泰文，久保恭子，横山雅紀，新矢喜章，岡崎禎子，津田修，長井 裕，棚橋善克，伊藤秀美：日本金属学会秋期大会概要集，(2004，秋田)，p. 275, No. #95.
  - 20) 今 大健，古屋泰文，岡崎禎子，野村 徹：日本金属学会秋期大会概要集，(2004，秋田)，p. 274, No. #94.
  - 21) 古屋泰文：日本機械学会，No. 04-6 (M&M 2004，秋田)，pp. 487-490.
  - 22) V. Varadan: Inter. Symp. Smart Mater. & Systems, Lecture (March 2004, Tukuba).
  - 23) 岸 輝雄：NIMS NOW, Vol. 1-1 (2001 年 4 月号)，p. 1.