

平成 18 年度成果報告書

「エアロゾルデポジション法 (ADM) を活用した  
新製品製造システム普及促進」に関する調査研究

平成 19 年 3 月

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

委託先：財団法人 製造科学技術センター

## 調査目的

本調査研究は、技術革新がめざましいセラミックス電子部品の高機能化と複合・集積化技術は、製品性能を飛躍的に向上でき、我国競争力の重要な技術の一つである。しかしながら、現状ではプロセス温度の低温化と材料組織の微細制御が大きな課題となっている。本調査では、このような背景を受け、国家プロジェクトとして研究開発を行っている「ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクト」の成果を基に、ADMによる成膜原理やその効果について、不可視化レベルの実体を可視化（モックアップやCG）し、ADMの内容を理解しやすくすることで、各産業分野の従来技術のADMへの新たな展開、あるいは従来技術とADMを使用したときの有効性の差異の確証を nanotech2007 国際総合展（下記参照）での展示会やワークショップの開催より得る事が出来た。また、プロジェクトで行っているADM技術が将来の生活等にもたらす利点を、製品展開を踏まえ具現化（原理モデル化）し、それらの情報を及び製造技術に関するニーズ（アンケート）調査を行い、新たな製造システム（オンデマンド生産システム）を提言した。

「エアロゾルデポジション法 (ADM) を活用した  
新製品製造システム普及促進」に関する調査研究

委託先：財団法人 製造科学技術センター

平成 19 年 3 月

## まえがき

近年、アジア・中国地域の低労働賃金等による製品製造の低価格化が進み、生産現場の海外シフトが大幅に行われた。その様な中で日本の製品が生き残るためには少なからず、製品製造のシステムや物流等体制の見直しを図り、企業・産業界が従来とは違った大きな変革をしなければ、世界では生き残っていけないような情勢になりつつあることは、周知の事実となっている。日本の製品製造が生き残るためには、日本オリジナルの技術を育て上げ、諸外国が真似の出来ない生産プロセスを構築することが必須となっている。

特に、携帯電話等を構成する高機能な電子デバイスは、日本の最も得意とする技術開発の分野でもあり、その技術は、日進月歩進歩しており、日本の製造技術の優位性を保つ要因の一部となっている。その中でも、ニーズの高い、複合酸化物材料の集積化プロセスを利用した各種薄膜技術は、従来、窒素法を用い、限られた材料・材質で、高温で焼きつけを行うため、ある条件下でしか実現できなかった電子デバイスを、低温・高速のセラミックコーティングを実現する新たな取り組みであるエアロゾルデポジション法（ADM）を活用し、乾燥した微粉体を原料ソースとし、固体状態のまま衝突させ基板上に膜を形成する技術を発見した。

この技術の展開として、平成14年度から5ヵ年をかけ、国家プロジェクト「ナノレベル電子デバイス材料低温成形・集積化技術」が行われている。

今回、本調査として、ADM各種技術等の原理・現象の解明や利点等技術の変移、展開を分かりやすくまとめ、電子デバイス開発以外での活用可能性や他技術との融合による新たな製品製造を実現するための道しるべをつけることを目指しております。

本調査研究の成果にて、他分野他業種の企業の製品企画や生産技術者が、当該分野に興味を持って頂き、自由な発想の基、活用してくれることを祈願しつつ推進して参りました。本技術の活用が日本の競争力強化に繋がれば幸いです。

最後にプロジェクト共同体メンバー及びご指導ご鞭撻頂きました経済産業省、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の関係各位に厚く御礼申し上げます。

ADMを活用した高機能・高効率部材製造技術調査委員会 委員長  
(ナノレベル電子デバイス材料低温成形・集積化技術プロジェクト プロジェクトリーダー)

明 渡 純

# 目次

調査目的	1
まえがき	2
<b>第1章 本調査の目的・内容・体制</b>	<b>5</b>
1.1 目的	5
1.2 目標	6
1.3 内容	6
1.4 体制	9
1.5 委員会開催状況	9
1.6 成果概要	10
1.7 委員会名簿	13
<b>第2章 エアロゾルデポジション法 (ADM) の特徴</b>	<b>15</b>
2.1 常温衝撃固化現象	15
2.1.1 常温衝撃固化現象が生じる条件	16
2.1.2 常温衝撃固化現象の特徴のまとめ	21
2.1.3 AD法の手法的な特徴	22
2.2 AD法と他のコーティング技術との比較	26
2.3 AD法の高度化への取り組み	30
2.4 AD法の特徴のまとめ	32
<b>第3章 AD法のメリットを生かした応用先</b>	<b>33</b>
3.1 電気機械応用分野	33
3.2 高周波応用分野	38
3.3 光技術分野	39
3.4 機械構造分野	43
3.5 AD法の応用範囲のまとめ	43

第 4 章	ADM に対する調査結果	44
4.1	Nanotech2007 . . . . .	44
4.2	展示会内容 . . . . .	45
4.2.1	作成イメージ . . . . .	46
4.2.2	未来での生活環境のシナリオ (AD 法が築く未来生活の世界) . . . . .	47
4.2.3	ワークショップ内容 . . . . .	49
4.3	アンケート結果 . . . . .	51
4.3.1	展示会場 . . . . .	51
4.3.2	ワークショップ来場者 . . . . .	51
第 5 章	ADM にかかわる特許	58
第 6 章	次期テーマに向けた提言・課題 (明渡 PL コメント)	61

# 第1章 本調査の目的・内容・体制

## 1.1 目的

技術革新がめざましく諸外国との競争も激化している情報・通信関連分野で、セラミックス電子部品の高機能化と複合・集積化技術は、製品性能を飛躍的に向上できる大きな可能性を秘めており、今後とも我国の競争力の鍵を握る重要な技術の一つである。しかしながら、現状ではプロセス温度の低温化と材料組織の微細制御が大きな課題となっており、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO 技術開発機構」という）では「ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクト」の中でエアロゾルデポジション法（以下、「ADM」という）の開発を平成14年度から平成18年度の5年間実施している。本プロジェクトでは、セラミックス微粒子の常温衝撃固化現象等の基本プロセス反応を詳細に解析し、それらをナノスケールで制御し、さらに高効率な非熱平衡プロセス技術等を付加・援用することで、プロセス温度を飛躍的に低減している。ADMは、ナノスケールで物質構造を精密制御して材料素材の機能・特性を飛躍的に向上させると共に、部材、部品レベルの高精度な微細成形や金属、ガラスなど複数の異種材料素材との複合・集積化を達成し、最終的な製品レベルで機能の飛躍的に向上することが可能である。

また、ADMは、コストやエネルギーを押さえ、生産効率を上げることで、より安価で精度の高い製品等各種デバイスが製作でき、各種製品の付加価値を上げることが可能となるため、プロジェクト以外の対象となるべき製品を市場調査等から分析・検討を行い、また、製造システムの現状及び課題を把握し、広範囲な各産業におけるADMを活用した高機能・高効率部材製造技術展開を調査することで、更にADMの適用を広げることが可能となる。本調査においては、製造技術産業の技術向上及び日本の競争力強化を図り、NEDO 技術開発機構が実施するプロジェクトの提案を行うことを目的とする。

## 1.2 目標

ADMを活用することで、電子セラミックス材料の集積化、積層化は基より、粒子コーティングによる製品対象として基板実装から硝子等装飾、食料品、化粧品分野などの、各種コーティング等の幅広い産業分野における新たなナノレベルの領域を得意とする製品・デバイスを明らかにし、それら製品の新たな製造システム開発に繋げることを目標としている

## 1.3 内容

本調査は、財団法人製造科学技術センターが独立行政法人産業技術総合研究所の協力を得て行う。ADMによる成膜原理やその効果について、不可視化レベルの実体を可視化（モックアップやCG）し、ADMの内容を理解しやすくすることで、各産業分野の従来の技術のADMへの新たな展開、あるいは従来技術とADMを使用したときの有効性の差異を確認する。また、プロジェクトで行っているADM技術が将来の生活等にもたらす利点を、製品展開を踏まえ具現化する。それらの情報を基に、自動車産業、装飾産業、食品産業、化粧品産業等を中心に、ADMの現状を把握し、将来製品展開を行うための製造技術に関するニーズの調査を行い、もって、新製造技術手法を提言する。

そのため以下の項目に関して現状分析と将来動向調査の検討を行う。

### (1) 現状技術とADMの比較調査

電子セラミックス材料の高機能化と複合・集積化技術は、その基本的な技術は、焼き物等の窯業技術を出発始点としており、現在でも、チップコンデンサーやセラミックス回路基板などを焼き付け製造している。また、半導体デバイス分野など各種関連分野では、薄膜生成法のひとつとして、熱や光、高周波プラズマなどを利用したスパッター法や化学気相成長法（CVD）などが盛んに研究されている。また、機械応用分野では、溶射技術はもちろんのこと、コールドスプレーなど様々な新規な厚膜コーティング技術などの検討も現実的なものとなりつつある。

ここでは、プロジェクト参画外の窯業関連会社や半導体製造関連会社数社にヒアリングを行い、過去から現在に至る製造技術法の経緯や製造コスト等の調査を行い、実用化の現状や現在までの技術トレンドをまとめる。また、様々な薄膜、厚膜技術の整理・体系化を行い、利点と欠点をまとめる。具体的な比較としては、従来の成膜等技術とその将来動向を調べる

と共に、ADMにおける成膜速度、成膜厚み、成膜可能材、膜の特性等の技術比較及び成膜コスト、装置コスト等の経済性比較を行い、ADM製造法による利点を分析することとした。

## (2)ADMのビジネスモデルの明確化

ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクトが対象としている製品化動向に関し、同委員会委員長及び製造科学技術センター研究員が中立的な立場でそれぞれの企業・大学の個別製品化の詳細動向を調査・分析を行い、ADM普及・促進委員会にて、プロジェクト参加企業・産総研・大学の成果を利用した製品化のターゲットや実現性について具体的なモデル（モックアップ、CG）等の製作を行い、ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクトにて得られた技術を活用しどのようなビジネスモデルで製品化され、どの様に社会に反映されるのかを具体化し、また、同時並行で、ADMの原理に関しモデル化を行い、本技術に対して知識がない者にも理解できるように明確化する。

上記調査分析結果を基に、モデルスペックをまとめ、モックアップやCG製作会社へ外注を行った。

## (3)ADMの普及促進技術調査

ADMやADMに類する技術（例えば、コールドスプレー等）の国内外の特許関連を調査し、ADMが目指すべき製造技術開発技術に対しどのような技術が特許として成立しているかの調査を行った。そのほか、ADM技術に関し、日本発の固有技術であることを確立するため、2月に開催する予定のナノテック2007と同時開催で、ADM普及・促進のワークショップ及びミニ展示会を実施、ADM技術の利点等広く普及させる。

## (4)ADM有効新製造システム調査

ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクトで過去開催及び発表・調査をしてきた学会やワークショップの技術動向調査結果やADMに興味を持つ企業等へアンケート調査を行い、その結果に関し、ADMを活用した高機能・高効率部材製造技術調査委員会にて、今後新たな市場創生が見込まれる高機能・高効率部材の課題を明確にする。また、有望と思われる企業等に対し、上記課題を基に新たな研究等取り組みの案を作成する。

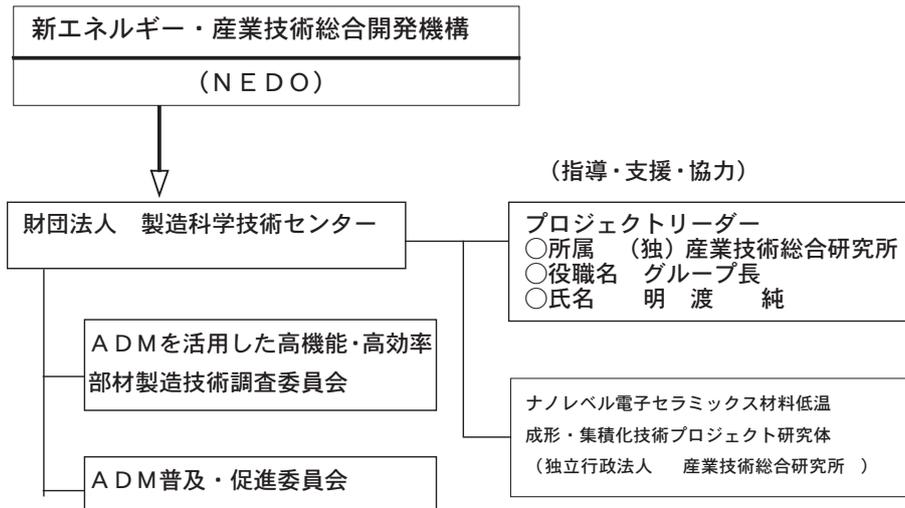
## (5) プロジェクト提案

上記(1)から(4)の調査をもとに、NEDO 技術開発機構が実施すべきプロジェクトの提案を行う。

## 1.4 体制

### 研究体制スキーム

この調査研究は、図 1.1 のような体制で実行した。



## 1.5 委員会開催状況

### (1)ADM を活用した高機能・高効率部材製造技術調査委員会

当初年間3～4回の開催を計画していたが、新たなプロジェクト化提案を行うにあたり、各社の守秘情報が含まれているため委員会形式での検討を断念し、各種問い合わせのある企業等と個別のヒアリングを行うことに変更した。よって、本年度同調査委員会は開催を見送った。

## (2)ADM 普及・促進委員会

### 第1回 委員会 平成18年10月25日(水)

委員会の主旨及び計画内容を報告。普及・促進の効果として平成19年2月21日～23日開催の nanotech2007 をターゲットにすることとした。

また、現在 ADM に取り組んでいる企業からヒアリングを行い、利点等に関し情報交換を行うこととした。

### 第2回 委員会 平成18年12月21日(木)

未来イメージのモックアップや原理・現象を可視化したモデルを作成。ナノテク専門家だけでなく皆が理解できるような内容にするための議論を行った。また、CG を駆使した、ADM のプロセスをビデオ化し展示会場等で放映することとした。

### 第3回 委員会 平成19年 1月26日(金)

nanotech2007 に対応するビデオやモックアップの最終確認を行い、効果的な見せ方やストーリーについての検討を行った。

## 1.6 成果概要

技術革新がめざましいセラミックス電子部品の高機能化と複合・集積化技術は、製品性能を飛躍的に向上でき、我国競争力の重要な技術の一つである。しかしながら、現状ではプロセス温度の低温化と材料組織の微細制御が大きな課題となっている。本調査では、このような背景を受け、国家プロジェクトとして研究開発を行っている「ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクト」の成果を基に、ADM による成膜原理やその効果について、不可視化レベルの実体を可視化（モックアップやCG）し、ADM の内容を理解しやすくすることで、各産業分野の従来の技術の ADM への新たな展開、あるいは従来技術と ADM を使用したときの有効性の差異の確証を nanotech2007 国際総合展（下記参照）での展示会やワークショップの開催より得る事が出来た。また、プロジェクトで行っている ADM 技術が将来の生活等にもたらす利点を、製品展開を踏まえ具現化（原理モデル化）し、それらの情報を及び製造技術に関するニーズ（アンケート）調査を行い、新たな製造システム（オンデマンド生産システム）を提言した。

参考：Nanotech2007 出展及びワークショップ報告

東京ビックサイトにて、平成 19 年 2 月 21 日（水）～23 日（金）まで nanotech2007 が開催され、NEDO ゾーンにて本プロジェクトの成果内容の展示を行った。

今回は、従来のプロジェクト成果を展示すると共に、ADM 普及調査事業と併せ、ナノレベルの不可視技術の可視化（CG：ビデオ）。未来の生活の中での同技術の応用事例等（モックアップ）を展示する新たな試みを行った結果、ブース来場者もかなりの数を数えた（アンケート・名刺合計 328 名。会場への来訪者は、約 1500 名程度（推定値））。また、今回展示会と同時並行で、プロジェクト成果報告会としてのワークショップを開催。定員 120 名の所、当日参加者を含め、約 160 名の参加があった。（お断りをしている関係から 200 名以上の申込があったと推定されます。アンケート回収約 60 名）

展示会においても、ワークショップにおいてもかなりの好評を得ており、本年度終了の同プロジェクトに対する興味は多く、次期プロジェクトへの展開が期待される結果になった。



© Nanotech2007 展示ブース



◎ワークショップ会場

## 1.7 委員会名簿

### 委員長

小木曾 久人 独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門  
集積加工研究グループ 主任研究員

### 委員

中野 禅 独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門  
集積加工研究グループ 研究員

馬場 創 独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門  
集積加工研究グループ 研究員

清原 正勝 東陶機器株式会社 総合研究所 基礎研究部 部長

服部 親将 ブラザー工業株式会社プリンティング・アンド・  
ソリューションズカンパニー 生産技術部 部長

今中 佳彦 富士通株式会社 テクノロジーセンター実装技術統括センター  
センター長付

加藤 義寛 ソニー株式会社 モノ造り技術センター 技術開発室  
EMC最適設計技術課

大橋 啓之 日本電気株式会社 基礎・環境研究所 研究部長

相澤 周二 NECトーキン株式会社 研究開発本部 材料開発センター  
マネージャー

### (プロジェクトリーダー)

明渡 純 独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門  
集積加工研究グループ グループ長

### (オブザーバ)

一ノ瀬祐亮 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
機械システム技術開発室 主査

瀬渡 直樹 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
機械システム技術開発室 主査

(事務局)

笹尾 照夫	財団法人	製造科学技術センター	調査研究部	部長
外山 良成	財団法人	製造科学技術センター	調査研究部	主席研究員
間野 隆久	財団法人	製造科学技術センター	調査研究部	課長

## 第2章 エアロゾルデポジション法 (ADM) の特徴

エアロゾルデポジション (AD) 法は、その名の通り、微粒子を搬送ガスと混合し、タバコの煙のようなエアロゾル状態にして、これを減圧チャンバーの中で基板に吹きつけ、基板上に成膜する方法である。この方法では、従来、「焼き物」といわれるように、焼結過程が不可欠だったセラミックス材料でも室温で成膜できるという、他にはない優れた特徴を有している。AD 法においては、その成膜メカニズムとして特徴的な常温衝撃固化現象を利用して、AD 法はその常温衝撃固化現象を具現化するための方法ということになる。従って、AD 法の特徴を考えるとときには、「常温衝撃固化現象」という物理現象の特徴と、AD 法というプロセス技術の手法としての特徴と分けて考えたほうがよい。以下にそれぞれの特徴を示した。

### 2.1 常温衝撃固化現象

常温衝撃固化現象は、文字通り、常温=室温で、粉末材料が強固に固まる現象の事をいう。これは、従来、焼結過程を必要としていたプロセスとは大きな違いである。そこで、常温衝撃固化とは、現象的にどのようなものであるかをまず示す。

図 2.1 は石英基板上にアルミナ微粒子を室温で AD 法を用いコーティングし、そのコーティング膜の構造を TEM で見たものである。サブミクロンサイズの原料微粒子は単結晶で、結晶サイズも微粒子サイズと同じである。AD 法で形成された膜は、数 nm～数 10 nm 程度の結晶からなる多結晶体になっている。つまり、原料粒子の結晶サイズが微結晶化して成膜されていることがわかる。また、膜中にはポアはみうけられず、極めて緻密な膜が形成されている。

実際に、AD 法で成膜した粒子がどのように変形するかを確かめた実験結果を図 2.2 に示す。アルミナと PZT の原料粉 (2.2 (a)(b) ) を混合し、その混合粉を使って AD 法成膜を行い、形成された膜の断面を TEM で観察した (2.2 (c) )。TEM 像においては、原子量の大きな鉛を含む PZT の部分の電子線の透過率が小さく、暗い像になるので、どの部分が PZT

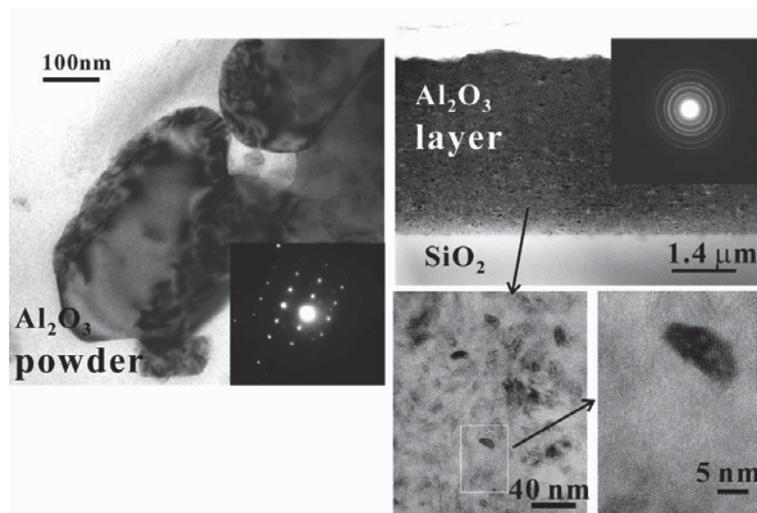


図 2.1: 石英基板上に AD 法によって形成されたアルミナ膜とその原料粉の TEM 像

でどの部分がアルミナであるかがはっきりとわかる。PZT、アルミナともに、押しつぶされたように変形していることがわかる。

これらの結果から、常温衝撃固化現象のイメージを模式図として、図 2.3 に示す。常温衝撃固化現象のメカニズムは、数 100 m/s 程度に加速されて原料粒子は、基板に衝突し、その衝撃によって、微粒子が破碎変形することによって、表面が活性化され緻密な膜が形成されると、現在のところ考えられている。

### 2.1.1 常温衝撃固化現象が生じる条件

#### 粒子速度との関係

常温衝撃固化現象は、脆性材料であるセラミックスが、図 2.2 のように、大きく変形するような一見極めて奇妙な現象が生じている。そこで、どのような条件下で、このような常温衝撃固化現象が生じているかを整理する。図 2.4 は、AD 法において、PZT と  $\text{Al}_2\text{O}_3$  微粒子の速度と搬送ガス流量との関係を示した図である。この実験で、常温衝撃固化現象によって成膜するためには、およそ 150 m/s 以上の粒子速度が必要であることがわかった。すなわち、常温衝撃固化現象は、トリガーとなる運動エネルギーが必要であることを示している。このような速度領域で衝突現象がおこった場合、微粒子がどのような状態になるかを推定した結果を図 2.5 に示す。これは、 $0.3 \mu\text{m}$  のアルミナ粒子を 300m/s で衝突させたときを、

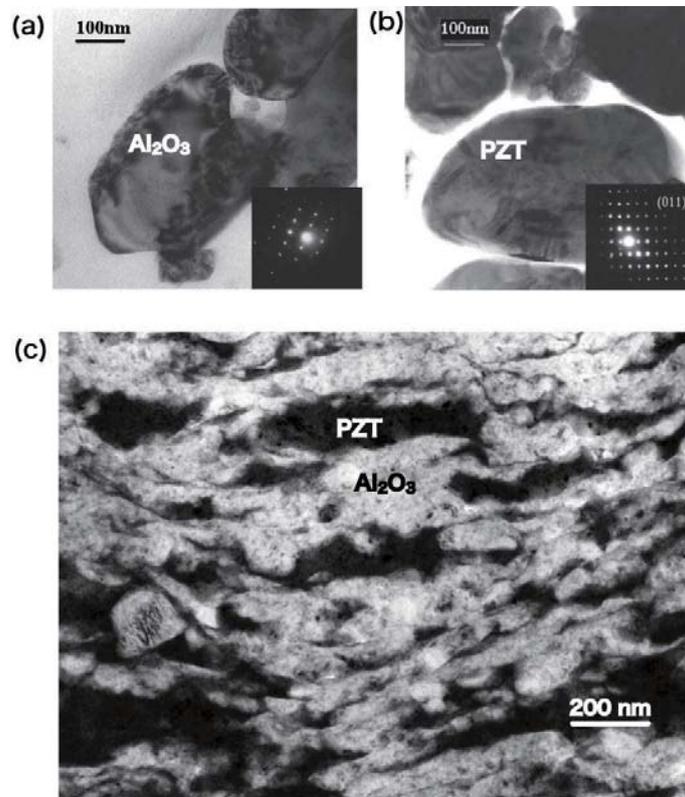


図 2.2: AD 法によって原料粒子がどのように変形したかを示した結果 (a) 原料  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子, (b) 原料 PZT 粒子, (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  と PZT 混合粉から AD 法成膜した膜の断面 TEM 像、黒色に見えるのが PZT、白色に見えるのが  $\text{Al}_2\text{O}_3$  となり、(a), (b) で示した原料粉の形が、つぶれるように変形していることがわかる

断熱条件で有限要素法を用いて、衝突した微粒子の温度と応力分布を求めたものである。温度については、局所的に一番大きなところでも、 $280^\circ\text{C}$ 程度にしかなっていない。これは、アルミナの融点と比べて著しく小さい。従って、常温衝撃固化現象においては、少なくとも熱平衡の概念で定義される相変化としての融解は起こっていないと考えられる。

常温衝撃固化現象が生じる為には、粒子が衝突したあと、図 2.2(c) のように、原料微粒子の形状が大きく変形しなければならない。その変形は、図 2.5 で計算されているような、粒子中の応力によって引き起こされる。従って、常温衝撃固化現象においては、微粒子が応力によって、どのように、変形・破壊するかの挙動を調べる必要がある。そこで、常温衝撃固化現象のメカニズム解明のために、図 2.6 のような、微粒子圧縮試験装置が開発され、各種微粒子の圧縮試験が実行された。この装置は、集束イオンビームでダイヤモンド圧子先端を

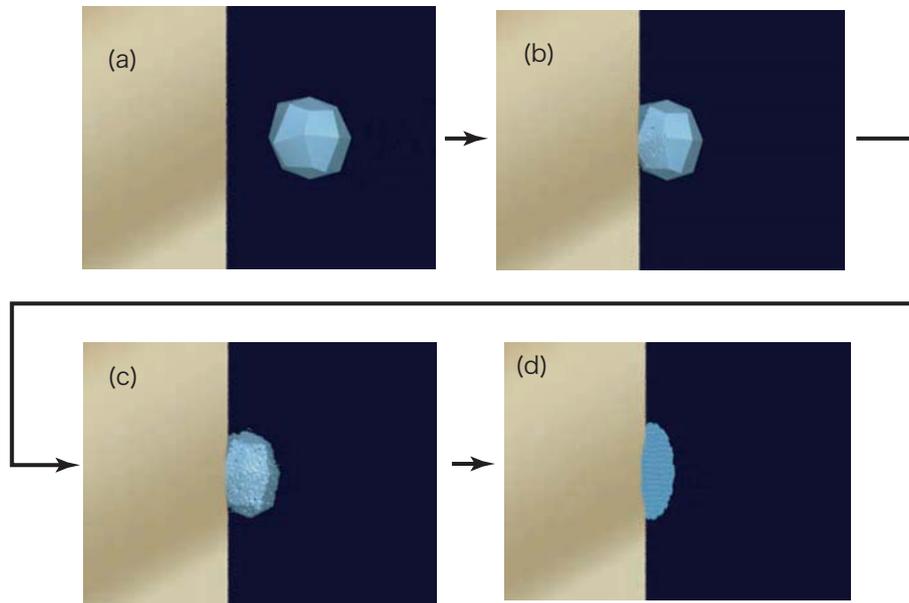


図 2.3: 常温衝撃固化現象の模式図 (a) 衝突前, (b) 衝突直後, (c) 衝突後の破碎・変形, (d) 微結晶化して緻密に堆積

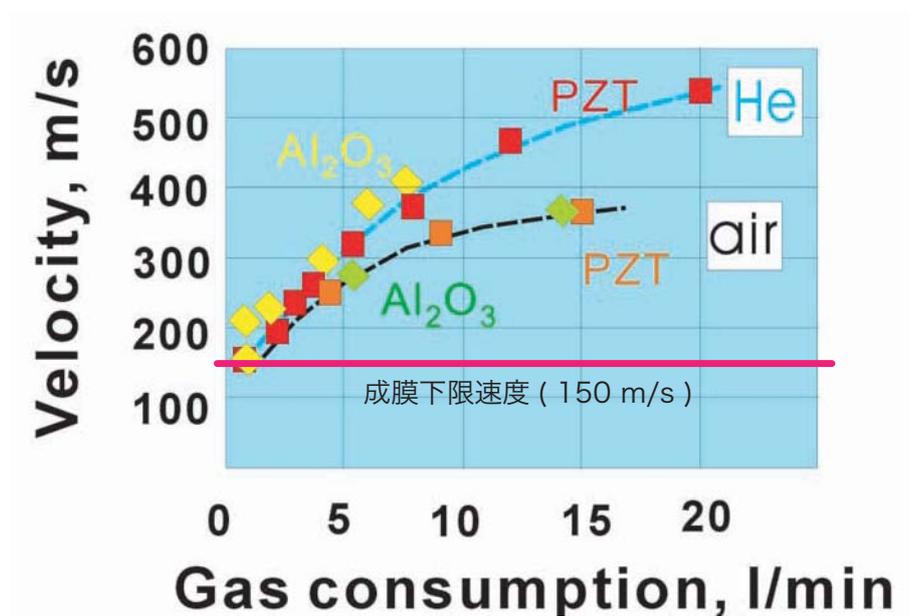


図 2.4: AD 法におけるガス流量と微粒子の速度

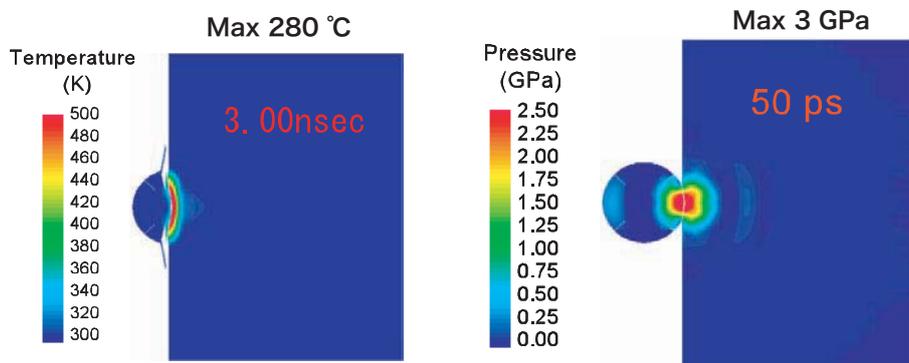


図 2.5: 粒子衝突時の温度上昇と応力の有限要素法による推測値

微粒子径と同じ程度の平坦部を持つように加工し、この圧子とダイヤモンド基板とで微粒子を挟むようにして圧縮試験を行う装置である。この装置は、準静的に応力を掛けるものであるため、AD法のような衝撃的な負荷条件下での強度評価ではない。しかし、AD法での粒子速度（数 100 m/s）は、アルミナのようなセラミックス中の音速（アルミナの場合横波で 5500 m/s）よりもかなり小さい。従って、微粒子内部に衝撃波のような現象が生じるわけではないので、準静的な評価であっても、その破壊・変形挙動のよい目安になると考えられる。

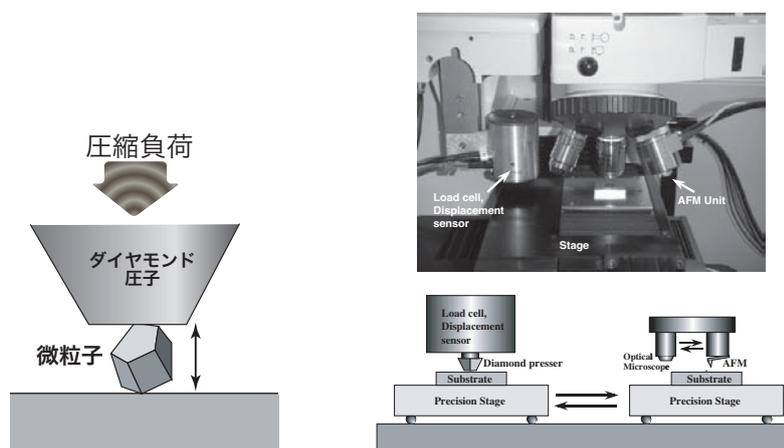


図 2.6: 微粒子圧縮試験の模式図とその実験装置

この装置で、圧縮試験を行った実際例を、図 2.7 に示す。これは、グラフ中の負荷チャー

トのように、繰り返し負荷を徐々に大きくしながら、微粒子にかけて行ったときの。負荷-変位曲線である。この結果からわかるように、セラミック微粒子は負荷が小さいうちは、負荷がかかるにつれ変形するが、その変形は可逆的で、弾性変形が主であることがわかる。それが、ある負荷になると急激に変形（破壊）することがわかる。この急激に変形する時の負荷を破壊負荷として、微粒子の強度を求めることができる。

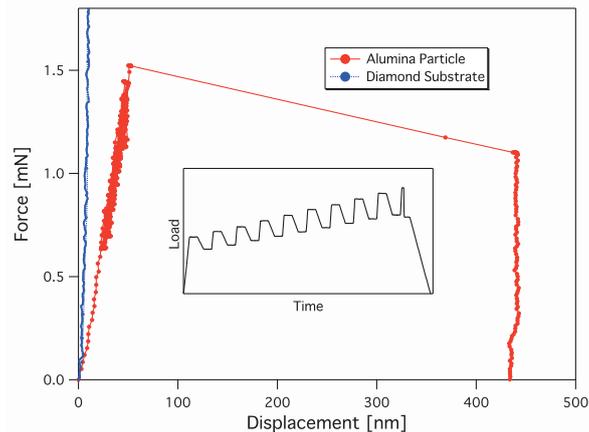


図 2.7: 粒径約  $0.7 \mu\text{m}$  の  $\alpha$ -アルミナ微粒子に対し、繰り返し負荷を徐々に大きくしながらかけた時の負荷-変位曲線

たとえば、 $0.7 \mu\text{m}$  の  $\alpha$ -アルミナ粒子について、粒子強度を評価した結果、その平均強度は  $2.6 \text{ GPa}$  であった。これは、計算によって見積もられた (図 2.5)、AD 法の成膜条件で衝突した時に発生する応力とほぼ一致した結果になっている。従って、粒子強度は AD 法の成膜条件と密接に関わっていることがわかる。

#### 常温衝撃固化現象と材料種・基板材料との関係

常温衝撃固化現象を発現する材料は、かなり幅広いことがわかってきている。図 2.8 は各種材料を AD 法を用いて、常温衝撃固化現象により成膜した材料の例である。アルミナのような酸化物材料、PZT のようなペロブスカイト構造をもつ酸化物材料、窒化アルミなど窒化物やホウ化マグネシウムのようなホウ化物、フェライトのような様々な材料でも成膜が可能であることを示している。いずれの場合も原料粒子の結晶サイズより、常温衝撃固化以後では、結晶サイズが小さくなっており、微結晶化が進んでいることがわかる。

基板材料についても、様々な材料上に成膜が可能である。後述するように、様々な応用を

目指して、多様な基板について成膜が試みられており、シリコンを始め、石英やガラス基板のような無機材料、ステンレスのような金属材料、また、プラスチックのような樹脂基板でも成膜が可能な事が示されている。ただし、非常に成膜しにくい、材料と基板の組み合わせもあるようなので、全ての材料と全ての基板材料の組み合わせで成膜できるかは定かではない。

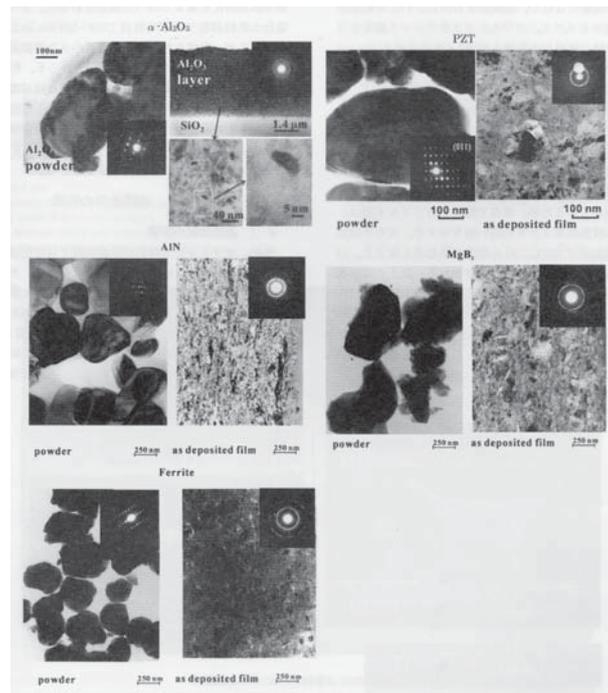


図 2.8: 各種材料の原料粒子と常温成膜固化現象によって固化した後の TEM 像

### 2.1.2 常温衝撃固化現象の特徴のまとめ

これまで述べてきたように、常温衝撃固化現象によって形成された材料は、単に、低温で作られたプロセスという以外に、ナノクリスタルが簡単に作成できるという、従来からのプロセスで作られた材料と比べてかなり異なる特徴をもっている。また、常温衝撃固化現象が生じる条件は、微粒子の物性が深く関わっており、基礎的な研究解明が今後も望まれる。

### 2.1.3 AD法の手法的な特徴

AD法は、これまでのべたように、原料粒子を搬送気体の混合し、エアロゾルの状態で基板表面に吹きつけ、そこで常温衝撃固化現象を起こすことによって基板上に成膜する方法である。図2.9に、その構成図をしめす。成膜室を真空ポンプで減圧することによって、圧力差を作り、その力で搬送ガスのフローを作る。このガスはエアロゾル化室で、原料微粒子と混合、エアロゾル状態になった後にノズルで加速されて基板に吹きつけられる。

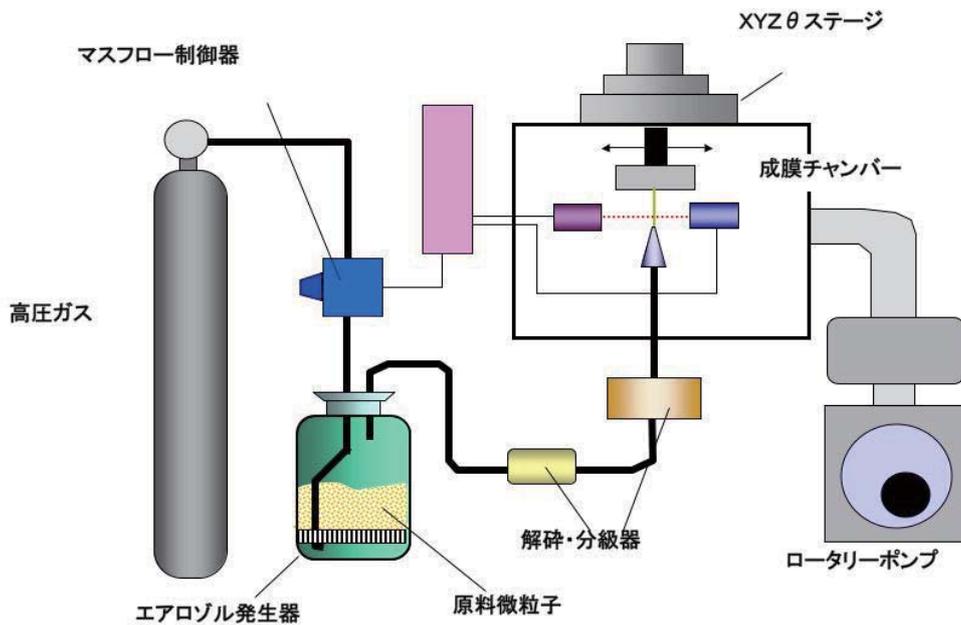


図 2.9: AD 法装置の概要図

表 2.1 は、代表的な AD 法の成膜条件である。エアロゾルとして成膜室に導入される事であるように、成膜中の成膜室の真空度は 0.4～2 torr 程度で、その他の真空プロセスと比べても、高い真空度を要求するものではなく、真空プロセスというよりは減圧プロセスというべき真空度である。常温衝撃固化現象を利用している為に、成膜中の試料温度は室温である。また、装置構成の中のどこにも、加熱機構や電離させたりプラズマ形成などする部分はない。(後述するように、形成された膜の物性を向上させる為に、レーザー加熱などを組み合わせる場合はある) スパッタリング法など薄膜技術においては、真空ポンプは単に真空を作る為だけに動作しているが、AD 法においては、同時にプロセス全体を進める動力源にもなっており、AD 法は、極めて簡便で効率的な手法であるといえる。

表 2.1: 代表的な AD 法の成膜条件

成膜室真空度	0.4～ 2 torr
エアロゾル化室真空度	100 ～ 500 torr
ノズルオリフィスサイズ	10 mm × 0.4 mm
搬送ガス	He, N <sub>2</sub> , Ar, Air
ガス流量	4 ～10 l/min
成膜中試料温度	300 K
成膜面積 (スキャン範囲)	10 mm × 10 mm
ノズルスキャン速度	0.125 ～ 1.25 mm/s
ノズル - サンプル間距離	10 mm

AD 法は、原料を微粒子の形で直接吹きつける方法 (マテリアルダイレクトライティング) であるため、成膜速度が極めて早く、非常に厚い膜をつくることも可能になる。2.10 はステンレス基板の上に AD 法成膜した PZT 膜である。およそ 0.5 mm の厚さがあり、目で見ても厚さがわかるぐらいである。AD 法では常温衝撃固化現象により、粒子破碎によって微結晶

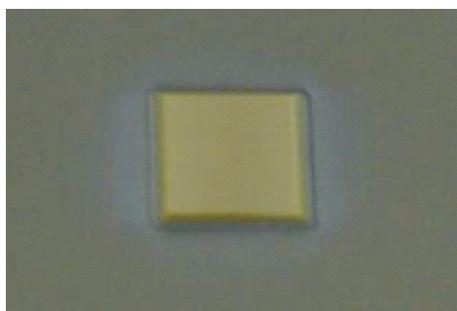


図 2.10: AD 法で、ステンレス基板の上に成膜した、PZT の厚膜 (厚さ 0.5 mm)

化し、原料粒子よりも小さな結晶粒 (数 nm～数 10 nm) をもつナノクリスタルとなる。この結晶粒の大きさの違いは、材料の外観にも大きな影響を与えている。可視光の波長よりも大きな結晶粒をもつ焼結体では、その界面で光が反射するために、材料中の光透過がほとんどなく不透明となるが、常温衝撃固化現象によるセラミックス膜においては、その結晶粒の大きさが可視光の波長より小さいため、材料中であまり散乱さず、ガラスのように透明な膜が形成されている。図 2.11 は、ガラス上に AD 法によって成膜した厚さ 5  $\mu$ m のアルミ

ナ膜である。下の文字がよく透けて見えていることから、膜が透明であることがわかる。



図 2.11: ガラス基板上的 AD 法によるあるアルミナ膜、ガラス基板の下の文字が透けて見えることから透明であることがわかる。

また、ノズルと試料の間に、スリットがあいたマスクを置くことで、成膜時にパターンニングが可能となる。図 2.12 に、ノズルを用いたパターン成膜の模式図と実際にパターン成膜した結果を示す。

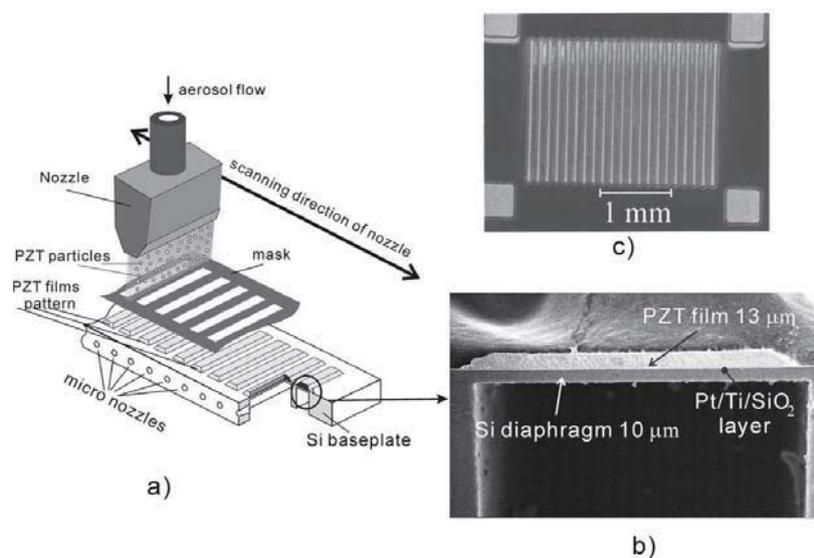


図 2.12: マスクを用いた、AD 法による成膜のパターンニングの模式図とその成膜例

AD 法で、大面積の成膜を行うためには、原理的には、ノズルからのスキャン範囲を広げ

ればいいことになる。しかし、同じ成膜条件でスキャン範囲を広げると、小面積の成膜に比べて、ノズルがサンプル面の同一箇所を通過する回数が減る。また、厚い膜を成膜するためには、成膜時間が長くするなどの必要が生じてくる。そのため、膜質や膜厚の均質性を保つためには、マルチノズル化を図るとか、スキャン方法やエアロゾル化の安定性などに注意する必要がある、大面積用の AD 装置の開発が必要となる。

図 2.13 は、産総研に設置されている大面積用の AD 成膜装置である。



図 2.13: 大面積用の AD 成膜装置

図 2.14 は、この装置で行った、4 インチシリコンウェハー全面に PZT 薄膜を堆積させた例である。成膜直後で、膜厚が約  $2 \mu\text{m}$  で均一な成膜がなされている。厚さのむらは、 $\sigma$  で 8 % 程度である。また、TOTO 株式会社では、50 cm  $\times$  50 cm 程度イットリア膜の均一成膜に成功している。

AD 法は、低真空で成膜が可能であり、加熱プロセスが不要、成膜レートが早いという特徴がある。この特徴を実際の成膜工程で考えてみると、真空度が上がるまで待つ必要がない。温度を上下する時間がない。予備工程を含む実際のプロセス処理時間を短くできるという特徴がある。これは、生産システムとしての AD 法の大きなメリットとなりうる。AD 法をうまく利用すれば、セラミックス薄膜が必要なプロセスを含む生産システムにおいて、時間を著しく短縮させ、on-demand に製造物を作成するシステムを構築できる可能性がある。図 2.15 は、産総研で開発した、on-demand 製造用の小型 AD 装置である。これは、後述する金属ベースの光スキャナー製造を想定して作成した小型 AD 装置で、さきに述べた大面積

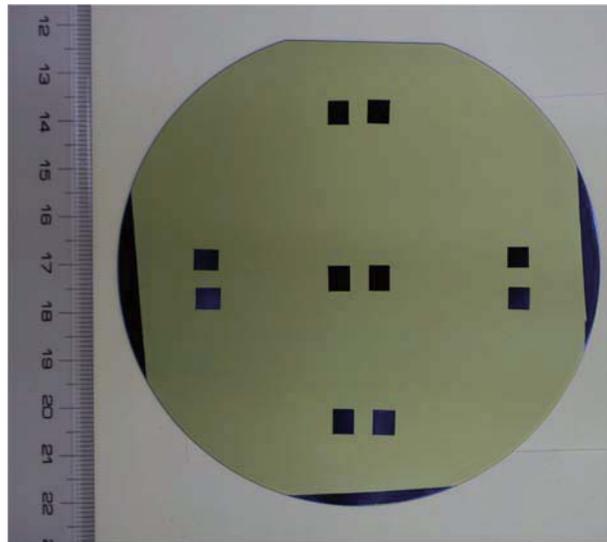


図 2.14: シリコンウェハー全面に AD 法で成膜した PZT

用 AD とは逆に、成膜面積は数 mm 平方程度で小さいが、試料を入れて真空引き、成膜、ベントしてから、試料を取り出すまでのタクトタイムが、わずか 10 秒程度と、成膜プロセスとしては、画期的に短時間処理を可能にしている。これも、AD 法の特徴を生かした興味深いアプローチといえよう。

## 2.2 AD 法と他のコーティング技術との比較

### 焼結技術との比較

従来、セラミックス材料は焼き物という一般呼称で知られるように、粉末を成形した後、高温で焼き固める焼結過程が必要であった。焼結は、高温化での熱拡散により、表面エネルギーをできるだけ少なくするように、粒子間が接合し、かつ、空隙を少なくする方向に結晶が成長していく過程である。通常、酸化物のようなセラミックス材料は、化学的に不活性で熱的にも安定であるため、焼結過程では、1000℃以上の高温が必要となる。そのため、セラミックス材料よりも融点が低い金属、高分子、ガラス材料などと一緒にこの焼結プロセスを実行することはできない。また、内部の空隙が少なくなるということは、全体の大きさは、粉末を成型した時に比べて小さくなることを意味しており、一般に焼結後、全体の体積が数 10% 小さくなる。また、焼結後も内部の空隙が完全になくなるわけではなく、2.16 のよう

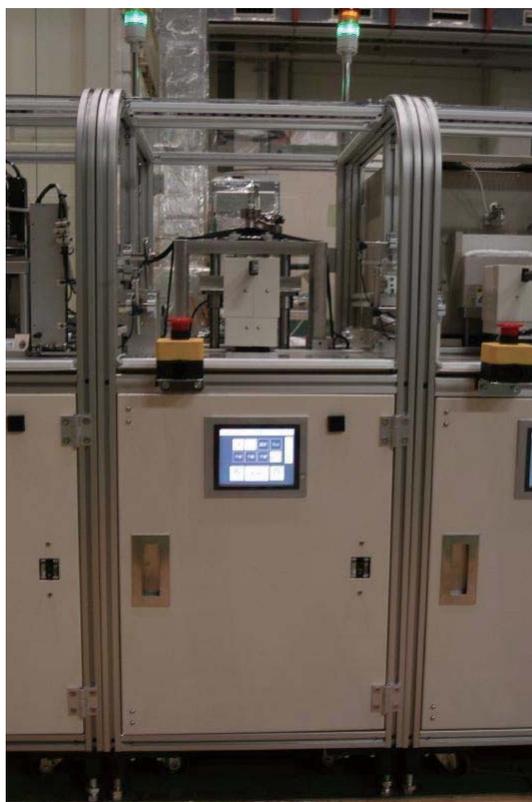


図 2.15: on demand 製造用に作成された、小型 AD 装置

に、わずかにポアと呼ばれる空隙が残る。従って、AD 法との最も大きな違いは、当然の事ながら、熱をかけることの有無と、焼結後の寸法変化であろう。

#### 薄膜技術との比較

PVD や CVD の薄膜技術では、材料を高温で昇華させたり、原子やイオンの衝突によってたたきだしたりした、原子、分子レベル（クラスターと呼ばれる場合でも、数万から数十万個の原子集団）まで分解した状態で、基板に到達させ、基板上で、原子結合を再構築させて薄膜を作成している。図 2.17 にその様子の模式図をしめす。従って、成膜スピードは、AD 法のような常温衝撃固化現象によるものに比べて極めて小さい。また、個々の基板に到達する個々の原子がもつエネルギーは非常に大きく、数 eV 以上（気体の熱による分子運動と比較すると、数万度以上に相当）ある。従って、形成された薄膜は、焼結などゆっくりとした熱平衡状態で得られる以外の様々な相（たとえばアモルファス）が、プロセス条件

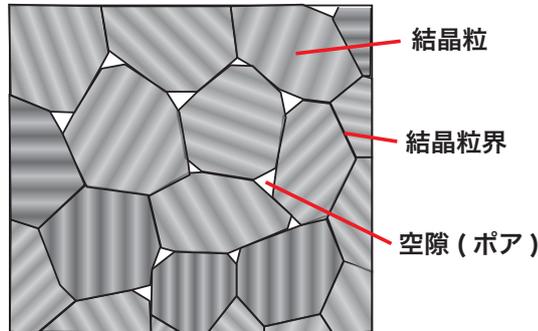


図 2.16: 焼結セラミックス断面の模式図

によって形成される。また、基板材料表面の原子種や格子間隔の影響も強く受ける。また、stoichiometry から外れた組成になることもしばしばである。一方、常温衝撃固化現象においては、形成した膜の原料粒子の stoichiometry からほとんど外れることはない。

さらに、薄膜技術においては、原子レベルのものを、基板上に移動させるために、高い真空度が要求される。さらに、不純物の混入を抑えるためには、超高真空が要求される。一方、常温衝撃固化現象を発生させている AD 法においては、成膜時が数 toor と、真空としてはそんなに高いレベルではなく、一見すると、内部に多くのコンタミネーションがあることが懸念される。しかしながら、基板まで材料が、サブミクロンサイズという、原子レベルから考えるとほかに大きな形で搬送されてくるため、暴露している部分の割合が極めて少なく、内部にコンタミネーションを抱え込む量は極めて少ない。

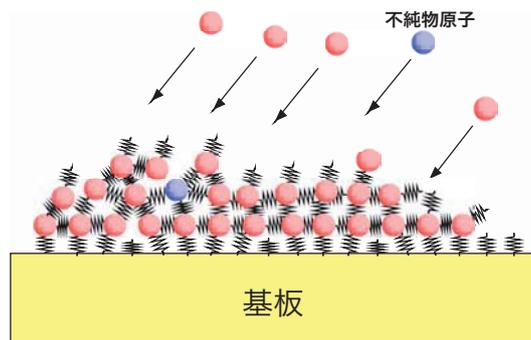


図 2.17: 薄膜技術での成膜の様子の模式図、青色粒子はコンタミ原子のイメージ

ちゅう

AD法の大きな特徴の一つとして、極めて大きな成膜速度が挙げられる。それは、基板上まで材料を粒子状で供給している為、蒸着やスパッタリング・CVDなどのように、原子・分子状態まで分解して搬送している薄膜形成法よりも、はるかに大量の物質を基板上に送ることができるためである。

焼結技術、薄膜技術、AD法の特徴をそれぞれ表2.2にその特徴をまとめてみた。応用を考える場合、この特徴が生きるような分野を選定することが肝要であると思われる。

表 2.2: 常温衝撃固化による材料と他のプロセスによる材料の特徴比較

	プロセス温度	結晶粒径	寸法変化	膜厚
常温衝撃固化	室温	数 nm ~ 数 10nm	ほとんどなし	0.1~数 100 $\mu$ m
焼結	1000 度以上	数 $\mu$ m 以上	数 10 % 縮む	30 $\mu$ m 程度以上
薄膜技術	室温~数 100 度	アモルファス~単結晶	ほとんどなし	数 nm~数 $\mu$ m

#### 他の微粒子衝突によるコーティング技術との比較

図 2.18 は、AD法と他の乾式微粒子衝突によるコーティング法との比較を、その粒子速度と粒子径および、その雰囲気成膜温度に着目して整理したものである。物理的には、いずれも粒子が衝突する方法であるが、エアロゾルデポジション法は、粒子速度が、他の方法とくらべて、粒子速度が小さく（これらは粒子を輸送する方法として、電界を用いる方法（静電微粒子衝撃コーティング、クラスターイオンビーム法）とガス搬送による方法と大きく二つに分類される。一般に、これらの方法は、微粒子の運動エネルギーを、衝突によって、時間的にも空間的にも局所的に熱エネルギーに変換することによって、材料が融点以上の高温になって粒子結合が生じるものと考えられている。しかしながら、各手法において形成された微粒子膜の粒子間結合の状態が同じかどうかについては明らかではない。

静電微粒子衝撃コーティング (EPID) 法の場合、膜厚は時間とともに飽和し、1  $\mu$  m 程度が限界とされ、また、基板材料は原料微粒子より硬度の低い材料に限られている。従って、原料微粒子が、基板の中に埋め込まれることによって、膜形成がされていると考えられる。ガスデポジション (GD) 法は、室温で金属ナノ結晶膜が形成することが可能であるが、膜密度は、理論密度の 55~80 % 程度で、バルク材料程度の電気伝導はそのままでは得られず、熱アシストによる結晶成長が必要になる。それに対し、AD法やコールドスプレー法の場合では、常温で緻密かつ高硬度の膜を作ることが可能になる。また、コールドスプレー法では、

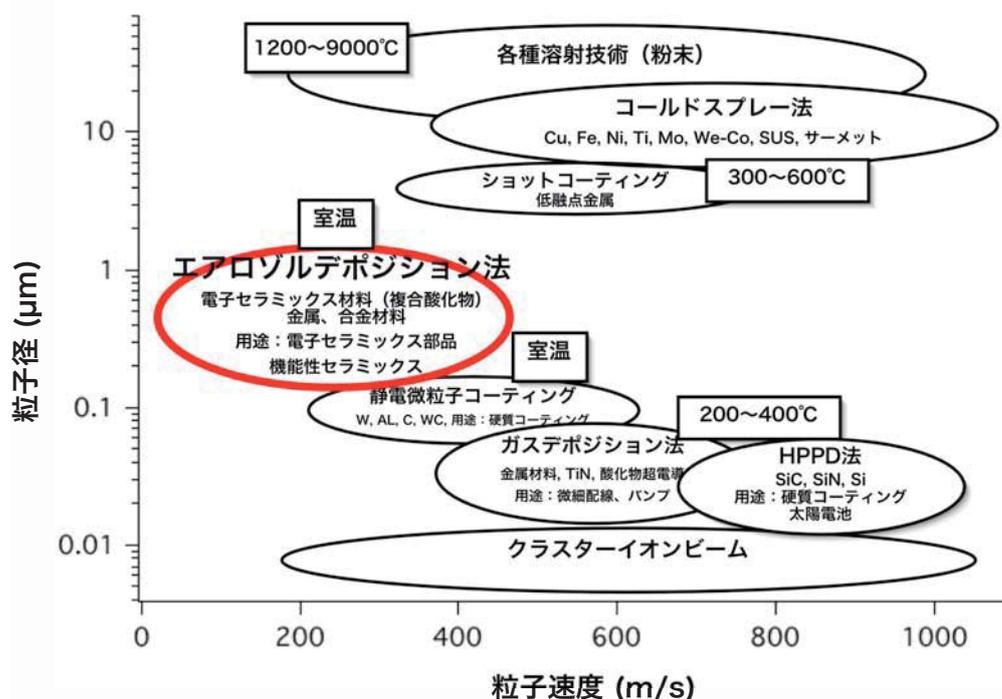


図 2.18: 各種固体粒子ビーム成膜法における粒子速度と粒子径の関係

現状では金属しか成膜に成功していないが、AD 法は金属を含め、セラミックス材料も成膜が可能である。一方、成膜速度は、溶射法やコールドスプレー法にくらべ、AD 法は小さい。

### 2.3 AD 法の高度化への取り組み

AD 法は、室温でセラミックス膜を作成することができる。しかも、機械特性や透明性などは、焼結したバルク材料と同じかそれ以上の特性を示す。しかしながら、室温で成膜した直後では、バルク材料と比べて劣る性質もある。その代表的なものとして、PZT の圧電定数が挙げられる。圧電定数は結晶粒界や応力などの影響で AD 法で成膜した直後では、いまのところ大きな圧電定数が発現していない。そのため、大きな圧電定数が必要になる場合は、結晶成長を促す為の熱処理が必要となる。このように、AD 法単独ではなく、その他のプロセスを組み合わせることによって、より実用に近いプロセス技術にしていく取り組みが求められている。

## レーザーアニーリングによる AD-PZT 膜の圧電特性向上

前述したように、AD法で成膜したPZT膜の圧電特性は焼結したバルク材料に比べて劣っている。熱処理を施せば、この圧電特性は回復するが、室温で成膜できるという、AD法の特徴を生かす為には、出来るだけ低温、かつ基板に影響を与えないように、特性を回復させることが望まれる。そのため、成膜した基板全体を熱処理するのではなく、膜だけを局所的に加熱することによって特性を回復させる研究が進んでいる。図2.19は、CO<sub>2</sub>レーザーを利用して、ステンレス基板上に作成したPZT膜の圧電特性を向上させた例である。CO<sub>2</sub>レーザーの波長である10.6 μmの赤外線は、PZTにはよく吸収されるが、ステンレスのような金属にはよく反射される。その差を利用して、基板上のPZTだけを集中的に加熱して、圧電特性を向上させた例である。

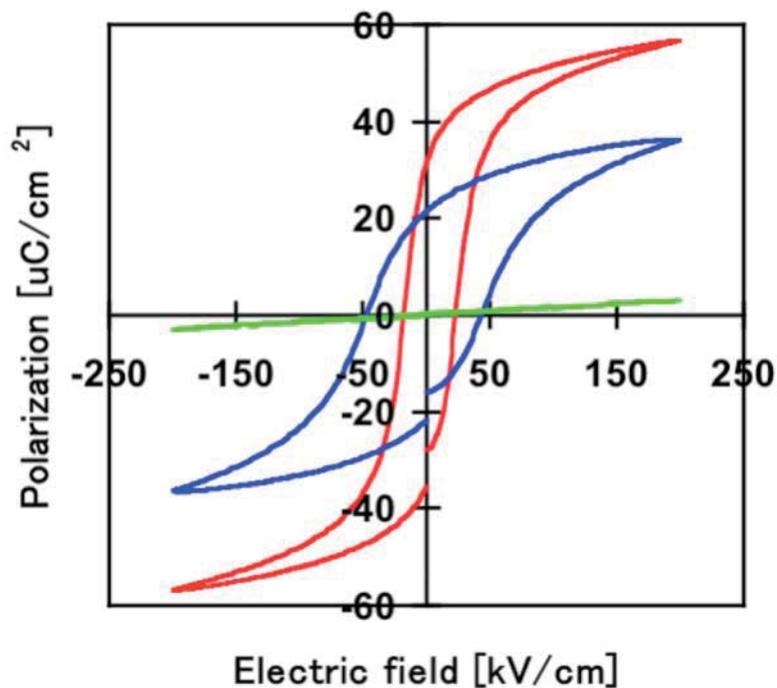


図 2.19: CO<sub>2</sub> レーザーで、圧電特性を改善した、AD 法で成膜した PZT 膜

## 2.4 AD法の特徴のまとめ

AD法は、常温衝撃固化現象を簡便に起こす事のできる優れた方法である。プロセスとしての特徴は、低真空しか必要としない、プロセス自体には熱を必要としないので、装置設計の自由度が高い、など優れた特徴を持っている。一方、粉体をそのままの状態で行うので、粉体のハンドリング（供給法やエアロゾルの安定性等）などは注意深く行わないと、最終的な膜の性質に大きな影響を与えることになる。今後製造システムとしてAD法を考えるときには、よりいっそう安定したシステムにすることが望まれる。

## 第3章 AD法のメリットを生かした応用先

AD法とそれによってできる膜の主な特徴を挙げると以下の通りとなる。

- 室温で成膜できる
- 寸法変化がない
- ナノクリスタルになる
- 機械強度はバルク材料なみ
- 基板は、Si, 金属, ガラス, プラスチックなど多岐に選べる
- 数ミクロンから数10ミクロンの厚膜の形成が可能

これらの特性を生かした、応用先として、以下のような分野についての、応用を目指した動向を紹介する。

### 3.1 電気機械応用分野

AD法で、成膜ができる代表的な材料の一つが、圧電性をもつPZTである。PZTはその大きな圧電特性をいかして、超音波モーター、スキャナー、インクジェットヘッドの駆動アクチュエータなど広く用いられている。そのため、AD法は基板選択の広さや厚い膜ができるなど、メリットが多くあると考えられ、AD法の応用先として期待される分野の一つとなる。

図3.1は、AD法を圧電アクチュエータに応用する時のメリットについての模式図である。従来、圧電セラミックスを作成するためには、焼結のため高温で処理する必要があり、このプロセスでは他の材料と一緒にすることはできない。したがって焼結した後、所定の形や大きさに加工・成形したのち、圧電セラミックスを他の部品に張り合わせて使用する。したがって、小さくて薄いもの（厚さ30 $\mu$ m以下）を作成することはできなかった。それに対し、AD法では、圧電材料を直接、様々な材料の上にコーティングできるので、うすく小さ

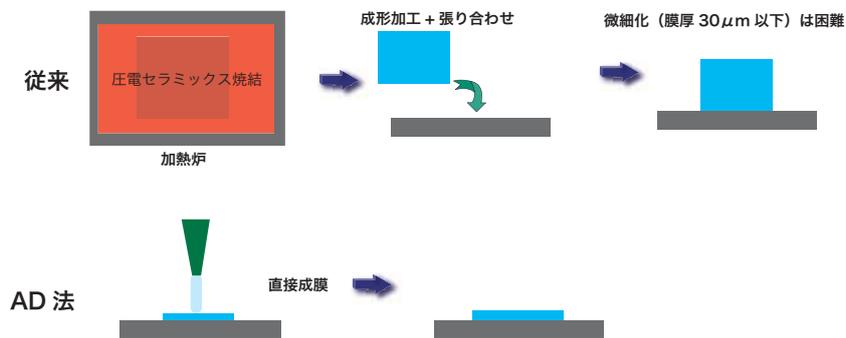


図 3.1: 圧電アクチュエータを AD 法で作成するメリット

なものの作成が可能である。また、曲面上の成膜やパターンニングもできるため、円柱の周囲や、複雑形状パターン成膜が可能になる。図 3.2 は、このような特徴を生かし、NEC トーキョー (株) が開発した、円筒チューブの上に PZT 膜を AD 法で成膜し、上部の球を自由に回転させるようにした超音波モーターの模式図である。

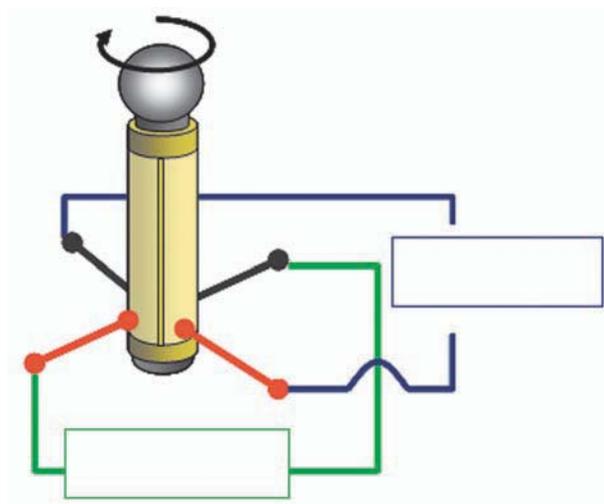


図 3.2: 円筒チューブ型の超音波モーターの模式図

AD 法を用いると、張り合わせの工程がはぶけ、またパターンニングできることから、インクジェット用のアクチュエータとしてのアクチュエータとしての応用も考えられている。図 3.3 は、ブラザー工業 (株) が、AD 法を用いて作成したインクジェットヘッドの設計模式図である。

近年、MEMS 技術が注目され、シリコン微細加工技術を利用して、シリコン上の微細パ

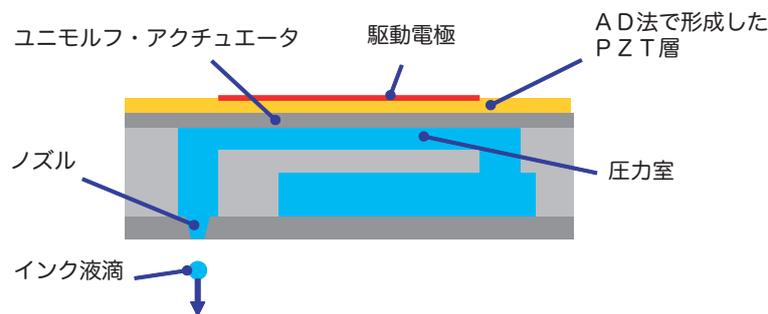


図 3.3: AD 法を用いたインクジェットヘッドの設計模式図

ターンと、静電や圧電アクチュエータやセンサーを組み合わせたデバイスの開発が進んでいる。しかしながら、基板がシリコン系の材料に限られるため、機械デバイスとしての特性に制限があった。また、圧電膜のような機能性薄膜も、数 $\mu\text{m}$ 程度の厚さまでしか形成できないため、発生できる力も制限がある。AD法では、これまで述べてきたように、圧電薄膜をパターンニング可能で様々な材料に直接コーティングできるため、MEMS作成のためのプロセス技術としても有望な技術である。図3.4は、金属板をプレスでパターンを打ち抜き、AD法で、圧電膜を取り付けて作成した、金属ベースの光スキャナーの模式図と、その実物写真である。この光スキャナーは、シリコン微細加工を使わないので、大きなクリーンルームを含むような設備を必要とせず、小さな設備で作成することができる。したがって、ロット数が少なくてもフレキシブルに生産できる可能性がある。さらに、メタルベースのスキャナーは、シリコンベースのスキャナーと比べても性能が高いことが分かってきた。図3.5は、これまで発表されたシリコンベースのMEMS光スキャナーと、ここで開発した金属ベースの光スキャナーの共振周波数とふれ角度をプロットしたものである。これからわかるように、金属ベース光スキャナーはシリコンベース光スキャナーよりも共振周波数が高くふれ角度も大きいなど性能が高い。

このように、高い性能をもつ光スキャナーデバイスであるが、その製作工程をみると、プレス成形、AD法による圧電膜の成膜、熱処理・ポーリング、配線からなっている。これらの工程は個別には、クリーンルームのような巨大な設備は必要としない。したがって、小さな設置面積、少ない設備投資、少ない時間で組み換え可能な、on-demand 製造システムを構築することができる可能性がある。図3.6は、このようなコンセプトを発揮すべく試作された、on-demand の光スキャナー製造システムである。これは、4つの共通規格のフレーム内にそれぞれ、プレス装置、AD成膜装置、熱処理装置、配線装置を組み込み、搬送システムでサンプルをそれぞれの工程に送ることで、最初は金属箔からスタートして、最後には

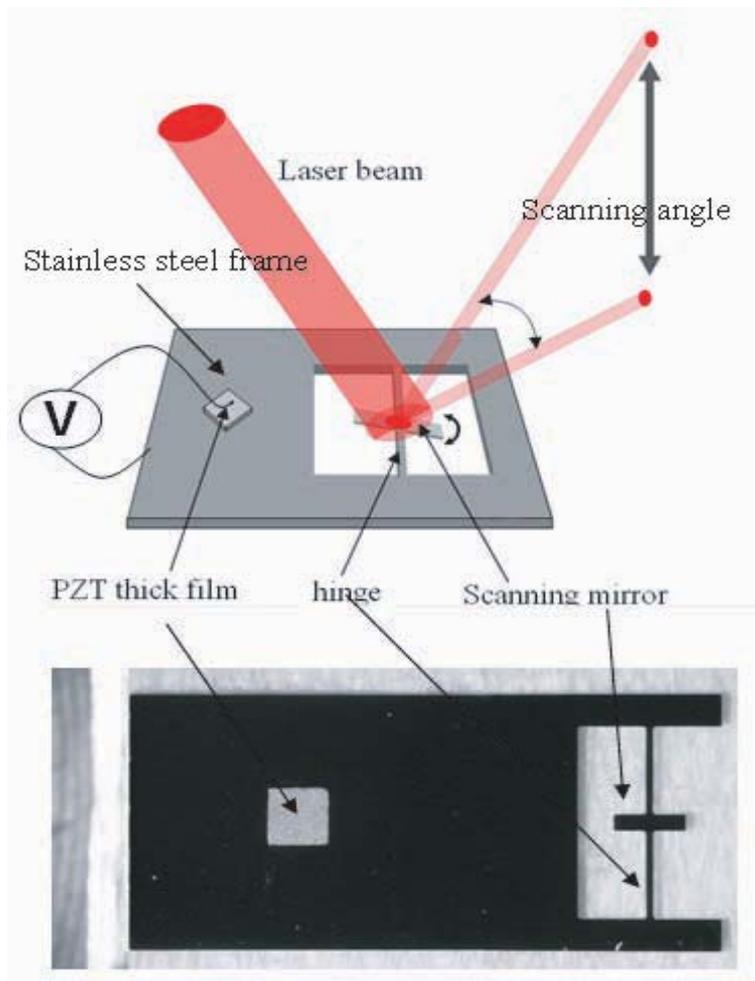


図 3.4: 金属ベースの光スキャナーの模式図とその実物写真

動作する光スキャナーを製造するシステムである。それぞれのフレームは接続することにより、電気や圧縮空気などが供給されるようになっていて、レゴブロックのように製造ラインを組み換えることが可能になっている。このような製造システムが可能になったのは、AD法が、室温・低真空、金属基板に直接成膜可能であることが、大きな役割を果たしている。ここでの、AD法の応用分野は、圧電アクチュエータということであるが、アプリケーション分野の枠を超え、製造システムそのものを変革するきっかけになる潜在力をAD法は秘めているといえる。

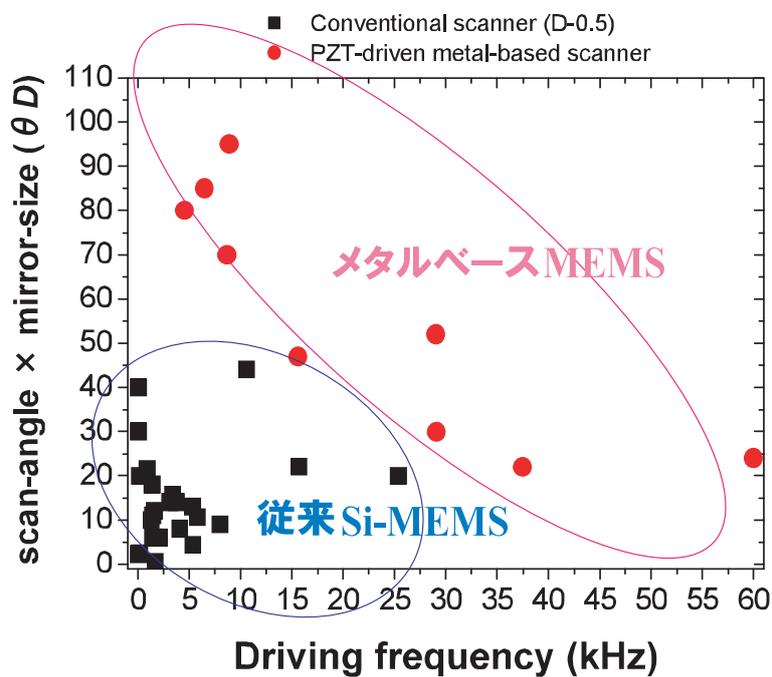


図 3.5: シリコン MEMS と金属 MEMS の共振周波数とふれ角度。金属 MEMS の方が、共振周波数、ふれ角度が大きい



図 3.6: 金属ベース光スキャナーデバイスを作成するために試作された、on-demand 製造システム。共通のフレームで構成された4つのユニットからなり、左からプレス装置、AD 成膜装置、熱処理装置、配線装置である

### 3.2 高周波応用分野

AD法では、チップコンデンサーの材料となるチタン酸バリウム (BTO) も成膜が可能であるなど、高周波用の受動素子デバイス開発も有望な応用分野といえる。たとえば、チップコンデンサーは非常に小型化されたが、現在でも、プリント基板上やLSIのパッケージなどに実装されている。これは、BTOを焼結するために熱処理が不可欠であるため、コンデンサーを別に部品として作成しなければならないからである。これに対し、AD法では熱処理が必要ないので、プリント基板に直接成膜が可能であり、図3.7のように、プリント基板に埋め込んだ形で、コンデンサーなどの受動素子を形成できる。図3.8は、富士通(株)がその

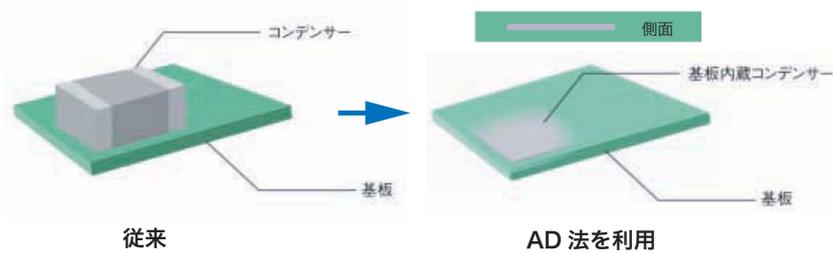


図 3.7: AD法による埋め込みプリント基板の模式図

ような目的で試作したAD法を用いたコンデンサー埋め込み基板とその断面図である。実用には、さらなる容量密度の向上が求められるが、AD法の特徴いかされる応用分野であると考えられる。

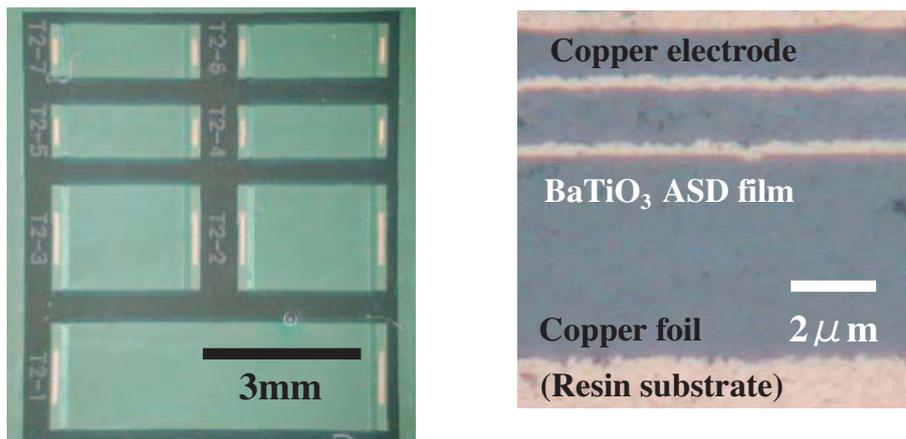


図 3.8: 試作したAD法による埋め込みプリント基板とその断面写真

AD法は、高誘電率をもつフィルムを厚く作成することができるため、電磁波を受信するアンテナアレーを小型化することが可能である。そこで、TOTO(株)によって、図3.9のように、壁などに埋め込んで使うマイクロ波イメージングセンサーに対して、AD法を適用する試みが進んでいる。AD法によって、高誘電率膜をセラミックス基板上のアンテナ表面に形成することによって、図3.10のように、従来のものよりも小型なセンサーを作成することに成功している。このようなセンサーが壁などに埋め込まれることにより、図3.11のように、高齢者のトイレや浴室などでの事故の早期発見や防犯などの身近な生活分野への応用が期待されている。

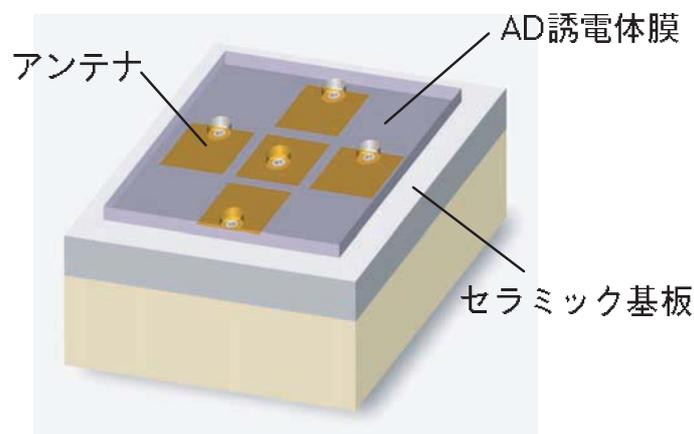


図 3.9: AD法を用いたマイクロ波イメージングセンサーの模式図

### 3.3 光技術分野

AD法=常温衝撃固化現象によって作成された膜の特徴の一つとして、結晶サイズがナノメートルサイズの微結晶体になっていることである。このサイズは、可視光の波長よりも十分小さいため、先に述べたように、AD法によって作成された膜は透明にすることが可能である。したがって、光デバイスに用いる事ができる可能性がある。図3.12は、ガラス基板上にAD法で作成した、電気光学(EO)効果をもつランタン添加チタン酸ジルコン酸鉛(PLZT)膜である。基板下の「AD」という文字がすけてみえていることがわかる。さらに、AD法によって作成した膜は、図3.13に示すように、現状ではPLZT系の薄膜として世界最高性能(電気光学定数; 102 pm/V, 透過損失: 1.7 dB/mm)をもつことも確認された。

AD法では、このようにEO効果の高い膜を、ガラスやシリコン基板に直接つけることが

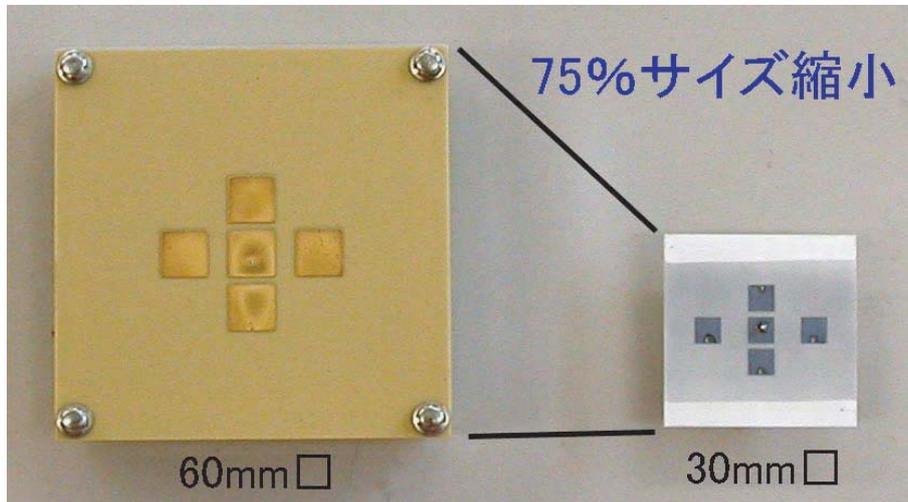


図 3.10: AD 膜を使用した試作イメージングセンサーと従来型センサーの比較。小型化に成功している

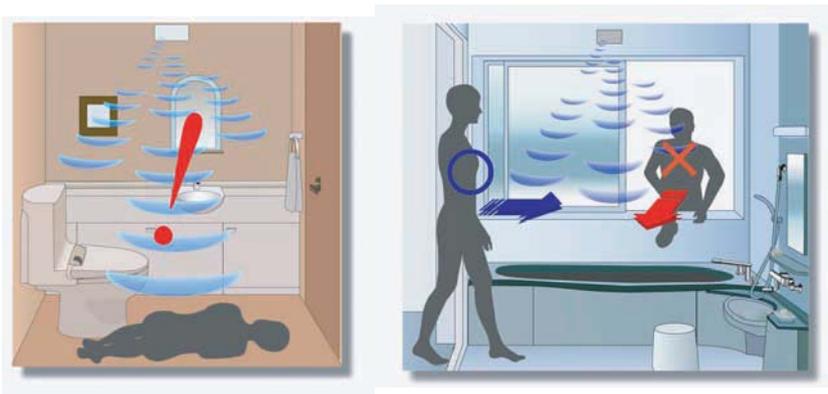


図 3.11: 開発されたイメージングセンサーの利用イメージ

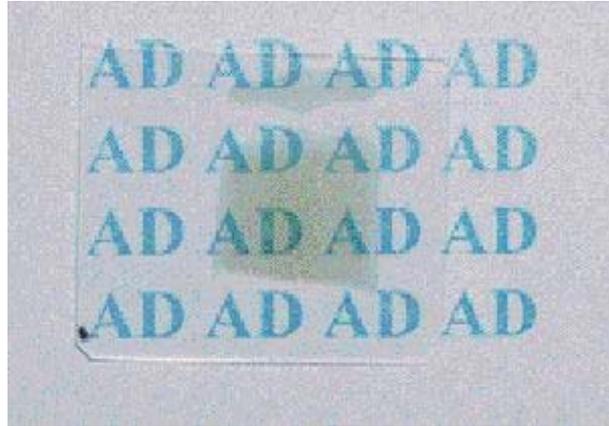


図 3.12: AD 法によって成膜された透明 PLZT 膜

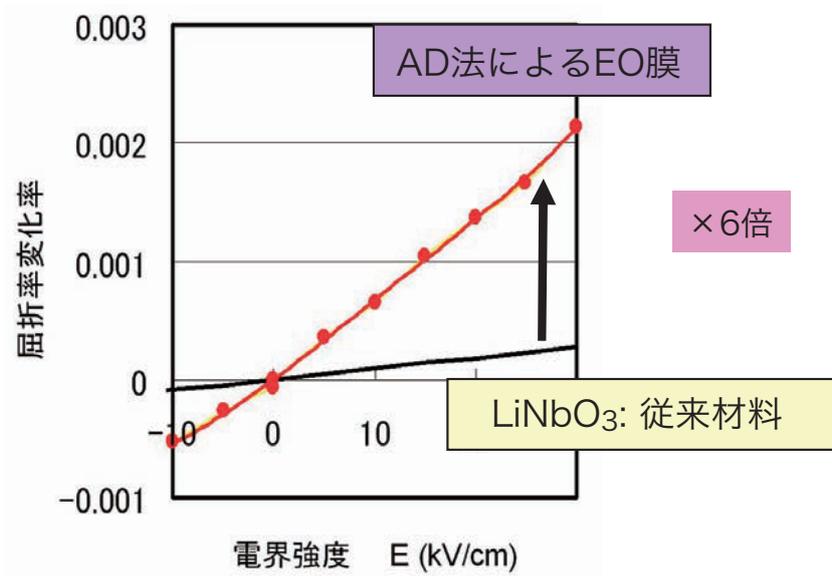


図 3.13: AD 法で作成された PLZT 膜の電気光学 (EO) 効果、グラフの傾きが EO 効果の大きくなる

可能になるため、様々な応用が考えられる。たとえば、NEC(株)では、図3.14の直径80  $\mu$ mの光ファイバーの先端にEO膜をAD法で着けることによって、電子回路中の狭い場所での電界を調べるための、超小型電界センサーを作成することに成功している。

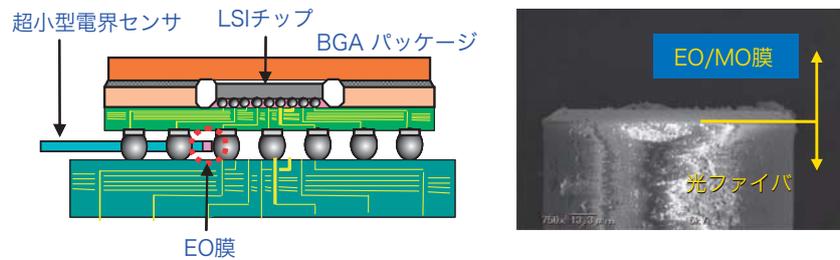


図 3.14: AD法を利用して作成された超小型電界センサー、(左) 超小型電界センサー利用イメージの模式図、(右) 光ファイバー先端に成膜された、EO効果のある薄膜

さらに、AD法では、シリコン基板上に、透明なEO薄膜を形成することができるため、図3.15のような、光変調器のような光素子を、半導体素子並サイズで組み込めるようになる可能性があり、今後の研究が期待されている。

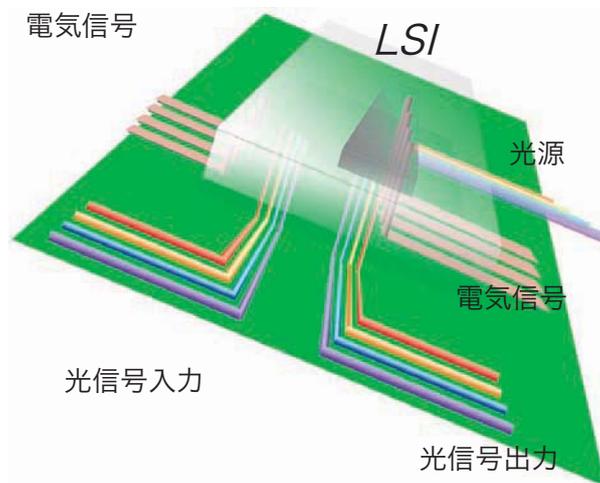


図 3.15: AD法を利用して、光素子を半導体回路に組み込んだデバイスのイメージ図

### 3.4 機械構造分野

AD法は、微粒子を吹きつけるだけという方法からは想像できないほど、緻密で強固な薄膜が形成されている。ビッカース硬度で2000と極めて硬い。また、密着力もきわめて高い。したがって、金型の耐摩耗性向上や、工具の長寿命化などの分野有望な応用分野であると考えられる。室温で成膜できることから金型や工具材料に対して悪影響を与えるような熱処理を加える必要がないのも大きな利点となり得る。

### 3.5 AD法の応用範囲のまとめ

AD法は、室温で膜形成が可能で、基板の選択性が高いという、他にプロセス上の特徴と、常温衝撃固化現象による膜が緻密なナノクリスタルであるという、同時に成膜直後では圧電定数などの電気特性がバルク材料よりは小さいなどと、材料物性そのものの特徴がある。その点で、AD法は他のプロセスにない際立った特徴を有しているといえる。したがって、AD法は従来は困難であった課題を解決する有力な選択肢になりうると考えられる。ここで紹介した応用分野へのアプローチはそのほんの一端であると思われる。今後、さらに、幅広い分野との情報交換を通じ、新たな応用範囲を開拓していく必要があると思われる。

## 第4章 ADMに対する調査結果

### 4.1 Nanotech2007

東京ビックサイトにて、平成19年2月21日（水）～23日（金）までnanotech2007が開催され、NEDOゾーンにて本プロジェクトの成果内容の展示を行った。

今回は、従来のプロジェクト成果を展示すると共に、ADM普及調査事業と併せ、ナノレベルの不可視技術の可視化（CG：ビデオ）。未来の生活の中での同技術の応用事例等（モックアップ）を展示する新たな試みを行った結果、ブース来場者もかなりの数を数えた（アンケート・名刺合計328名。会場への来訪者は、約1500名程度（推定値））。また、今回展示会と同時並行で、プロジェクト成果報告会としてのワークショップを開催。定員120名の所、当日参加者を含め、約160名の参加があった。（お断りをしている関係から200名以上の申込があったと推定されます。アンケート回収約60名）

展示会においても、ワークショップにおいてもかなりの好評を得ており、本年度終了の同プロジェクトに対する興味は多く、次期プロジェクトへの展開が期待される結果になった。



© Nanotech2007 展示ブース



◎ワークショップ会場

## 4.2 展示会内容

ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクト成果物及び将来的に当該技術がどう未来生活で活用できるかをモックアップ化し展示を行った。



未来の生活イメージ（周辺にはプロジェクト実施内容原理モデル）

また、今回の作成イメージと未来での生活環境のシナリオを、以下のように作成した。

#### 4.2.1 作成イメージ

##### nanotech2007 モックアップ生活イメージ

基本コンセプト AD法がもたらす将来生活製品の必要不可欠な部品の展開（AD法があったからこそ、このような製品が出来たというような主旨）

状況 2025年 中流家庭における生活の場を再現

（都心某地区高層マンションの2室例（3LDK：家族）と（1LDK：独居老人）対応）

A. 家族対応（夫婦・子供1人）→安心・安全が主題

B. 独居老人（老人1人暮らし）→QOL（クオリティ・オブ・ライフ）が主体

対応対象	将来イメージ例
A&B	携帯電話→ソニー、富士通
A	セキュリティー→東陶機器（玄関、窓にセンサー）
B	緊急時対応（老人対応：倒れてないかどうか）：トイレ、風呂場→東陶機器
A&B	騒音遮断壁（外に対するものと上下階の振動）→NECトーキン
B	高齢者医療（心臓ペースメーカーやパーソナルユースの医療機器、人工筋肉） →ソニー、NECトーキン
A	多チャンネル機能及び高速伝送処理 （テレビやパソコン：画面も大型化、高速処理としては3D表示ディスプレイ） →ソニー、NEC、NECトーキン
A	薄いパソコン、電気自動車の軽量化 （電気自動車普及：電源安定供給に必要な軽量コンデンサ（小型・軽量化）） →富士通
A（B）	小型・軽量大出力プリンタ （FAX、パソコン出力に対してポスターサイズ以上の印刷を高密度で可能となる。 例えば、現在の音楽のネット配信的な考え方で、 娘がファンであるミュージシャンのポスターはネット購入、出力できるようなもの。 又は壁紙のリニューアルをパーソナルベースで実施（大きなシールの様な壁紙）） →ブラザー工業
B（A）	メディカルチェック機能 病院に行くことなく平常の時に自然にメディカル情報を収集、 受け持ちの病院に情報を送信。医師の判断を仰ぐ） →センサー等（東陶機器）、携帯型機器（富士通）、多チャンネル情報伝送（ソニー） 高速高密度映像情報伝達（NEC）、人体外形情報：スキャナー（ブラザー工業） 心音情報収集：小型アクチュエータによる鼓動センシング（NECトーキン）

#### 4.2.2 未来での生活環境のシナリオ（AD法が築く未来生活の世界）

20XX年2月某日 東京郊外の緑地の中にあるマンションの一室、とある家庭では、いつもの週明けの朝を迎えていた。月曜日の朝はいつの時代も慌ただしい。ABC化粧品会社に勤務する夫・久人は、パンをかじりながら上着に腕をとおし、遠隔で家の外に停めてある通

勤用の燃料電池自動車のエンジンモータを遠隔装置でスタートさせた。半世紀前なら、エンジンを十分に暖めなければ快適な空調を望めなかったが、今では、省電力瞬高出力静音エンジンモーターのおかげで空調を瞬時に快適温度まで引き上げてくれる。家の外では、音も振動もしない車が、いつでも出発できる状態で主人が来るのを待っていた。妻・和美は、冷蔵庫の中の食材を、モニターを使い、3日後に賞味期限の切れる卵を手に取り、高校へ通う娘の朝ご飯を作り始めていた。自分も、インターネット裁縫店の店を開く時間が刻々と迫ってきており、多少焦りが生じている。光ファイバーによる光通信技術の進歩により、ファッションデザインが立体的にインターネット上で確認でき、和美のデザインする洋服は世界各地で高い評価を得ている。そのため和美は在宅の仕事として、仮想アパレルの商売を始めたのである。和美はオムレツを焼きはじめた時、同居している実母・絹代が、唯一楽しみにしている朝風呂からまだ上がってこないことに気がついた。フライパンから皿へオムレツを移しつつ、キッチンにあるモニターで、湯船につかっている絹代の動くイメージ像を確認し、娘・あゆみに声をかけた。

「早くしないと遅刻するわよー」。その頃、あゆみは自室で、携帯電話プロジェクターで空間に投影された高校の同級生の男の子とたわいのない話をしていて。ボーイフレンドの純くんである。今日の時間割を聞くつもりが、帰りのデートについての話になっている。携帯電話プロジェクターには純くんの顔の横に今週封切られた映画のタイトル一覧が表示され、机の上の超薄型プリンターからは印刷された情報が音もなくはき出されていた。

「はやくしなさいっ」キッチンから半分切れ気味の高い和美の声が響いた。

家の壁は、静音構造になっているため、外からの騒音や家の中の音を一切外へは出さない構造になっているため多少切れても回りに迷惑をかけることはない。

その頃、久人は静かな朝靄の中ゆっくりと会社へ向けて車をスタートさせた。

忙しい朝の風景の中で唯一ゆっくりとしているのは、居間の窓と兼用になった大型スクリーンから、トップニュースとして、「日本人のA博士がノーベル賞を受賞した」というニュースキャスターの落ち着いた声だけであった。

～ある未来の生活風景 copyright T.M～

上述は、あくまでもひとつの仮想の世界である。また、以下に示すモックアップもそれを具現化した物であって、必ず実現（製品化）するものかどうかはわからない。夢なのかもしれない。ただ、これらの夢を見えない技術が実現し、よりQOL（クオリティー・オブ・ライフ）を高めていくことは事実であろう。

見えない技術（ナノレベル関連技術）をどう生活に活かすかは個人個人の思い入れが重要

ではないだろうか。あなたは未来に何を望みますか？

#### 4.2.3 ワークショップ内容

nanotech2007の展示会と同時並行で以下の内容によるワークショップを開催した。

第2回プロジェクトワークショップ  
ープロジェクト成果最終報告会ー  
プログラム

開催日：平成19年2月21日(水)、22日(木)

開催場所：東京ビッグサイト609号室

2月21日(水)

##### 【開会セレモニー】

- オープニング（開会挨拶）主催者挨拶 高安 正躬、（(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 理事）
- 来賓挨拶 経済産業省 産業機械課 課長補佐 土屋 博史
- ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクトに関して、プロジェクト推進委員長 一ノ瀬 昇（早稲田大学 顧問研究員）

◎座長：小木曾 久人（プロジェクトサブリーダー/産総研）

##### 【プロジェクトリーダーによる概要説明】

- 常温衝撃固化現象の発見とエアロゾルデポジション技術への発展明渡 純（プロジェクトリーダー／（独）産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門集積加工研究グループ グループ長）

##### 【AD膜のプロセス応用】

- ミリ波アニールされたAD－PZT膜の微細構造解析巻野 勇喜雄（大阪大学 工学部 助教授）
- ステンレス基板の熱ダメージを抑えたPZT膜のレーザー照射馬場 創（産業技術総合研究所）

- AD法により形成した機能性セラミックス皮膜へのレーザ照射効果阿部 信行（大阪大学 工学部 助教授）
- AD法を用いて金属基板上に形成したアルミナ膜の機械的特性呉 世雄（産業技術総合研究所）

2月22日（木）

【AD膜の圧電応用】 ◎座長：鶴見 敬章（東京工業大学大学院）

- 微小圧電アクチュエーター形成およびそのアプリケーション展開、安井 基博（ブラザー工業（株）技術部 技術開発2グループ TM（チーム・マネジャー））
- AD法の圧電厚膜アクチュエータへの応用川上 祥広（NECトーキン（株）研究開発本部 材料開発センター）

【AD膜の高周波応用】 ◎座長：井上 光輝（豊橋技術科学大学）

- ADプロセスのRFモジュールおよび基板内蔵キャパシターへの応用鶴見 敬章（東京工業大学大学院 理工学研究科 教授）
- エアロゾルデポジションによるエンデッドイドパッシブ技術開発今中 佳彦（富士通（株）テクノロジーセンター実装技術統括センター長付）
- AD法による積層デバイス形成のための銅電極成膜森 正和（龍谷大学 理工学部 機械システム工学科 助手）

◎座長：中田 正文（日本電気（株））

- 磁性材料成膜におけるADMの応用とその電磁波抑制効果 加藤 義寛（ソニー（株）モノ造り技術センター技術開発室）
- イメージングセンサにおけるAD法の応用清原 正勝（東陶機器（株）総合研究所基礎研究部）

【AD膜の光応用】 ◎座長：今中 佳彦（富士通（株））

- AD法により作製したPZT膜の構造と光学特性津田 弘樹（産業技術総合研究所）
- エアロゾルデポジション法の光デバイス応用中田 正文（日本電気（株）基礎・環境研究所 主任研究員）

- AD法で形成したナノ複合 gold/PZT 膜の表面プラズモン共鳴朴 載赫（産業技術総合研究所）
- ホログラムメモリ用空間光変調器とエアロゾル・デポジッション法井上 光輝（豊橋技術科学大学 電気電子工学系 教授）

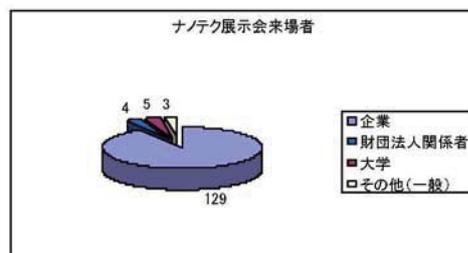
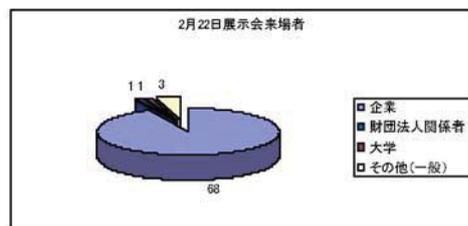
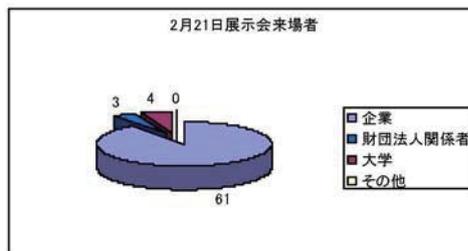
閉会挨拶 瀬戸屋 英雄（(財)製造科学技術センター専務理事）

### 4.3 アンケート結果

#### 4.3.1 展示会場

ナノテク展示会来場者

	企業	財団法人関係者	大学	その他	
2月21日	61	3	4	0	68
2月22日	68	1	1	3	73
合計	129	4	5	3	141



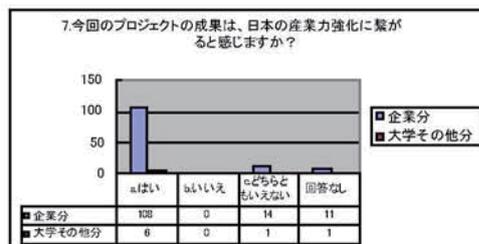
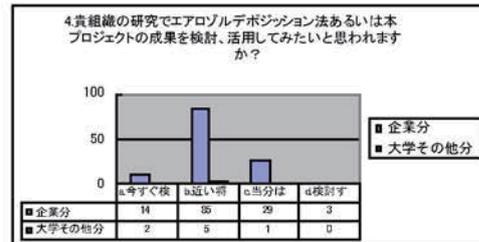
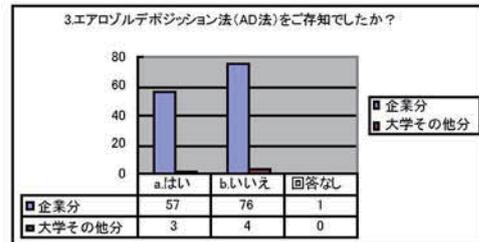
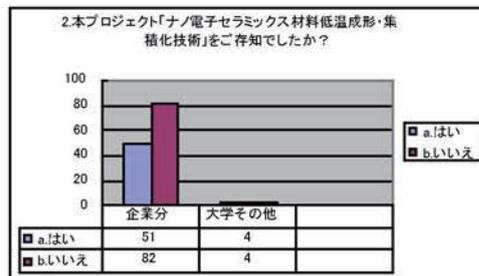
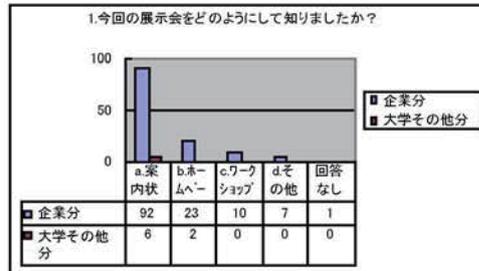
#### 4.3.2 ワークショップ来場者

hisane

アンケート集計(展示会)

①	a.案内状	b.ホームページ上	c.ワークショップ	d.その他	回答なし	
企業分	92	23	10	7	1	133
大学その他分	6	2	0	0	0	8
						141
②	a.はい	b.いいえ				
企業分	51	82				133
大学その他分	4	4				8
						141
③	a.はい	b.いいえ	回答なし			
企業分	57	76	1			134
大学その他分	3	4	0			7
						141
④	a.今すぐ検討、活用してみたい	b.近い将来検討、活用してみたい	c.当分は考え、ていない	d.検討する可能性はない	回答なし	
企業分	14	85	29	3	2	133
大学その他分	2	5	1	0	0	8
						141
⑦	a.はい	b.いいえ	c.どちらともい	回答なし		
企業分	108	0	14	11		133
大学その他分	6	0	1	1		8
						141

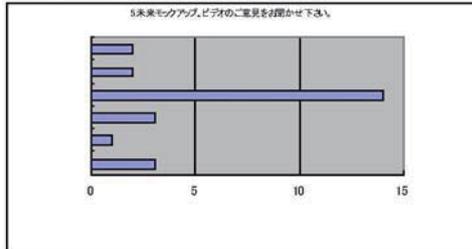
※展示会アンケートは、無記名なし



アンケート集計（展示会） 企業 129

5 未来モックアップ、ビデオのご意見をお聞かせ下さい。

【最も多かった意見】



【その他意見】

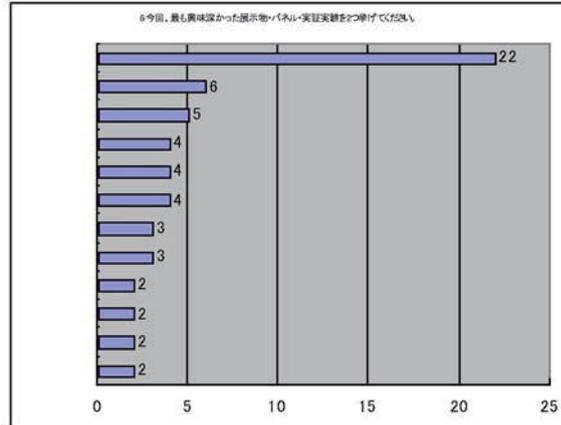
- 見えない...2件
- 初心者向け
- 夢がある
- 少しわかりにくい
- よく出まている
- モックアップが録画景
- モックアップは？である
- 子供向けにする必要がない
- わかりやすいが、今どの部分を説明していたかわかりにくい(モニターのすみに展示等するとよい)
- AD法について従来照相法との違いをわかりやすく説明している
- ビデオはもう少し専門的でも良いかもしれない
- 簡単に誤付け可能
- 大変参考になりました
- 少し簡単なすぎる。もう少し高度な解説も入れて欲しい
- AD技術説明と暮らしとの関係がわかりやすい

8. その他、プロジェクトやNEDO、産総研、製造科学技術センターなどのご意見、今後の本プロジェクトへのご要望など

- 装置の市販等は考えていらっしゃいますか？
- AD法をはじめ知り、興味深かった

6. 今回、最も興味深かった展示物・パネル・実証実験を2つ挙げて下さい

【最も多かった意見】



【その他意見】

- AD法による圧電アチエーデバイスの開発
- AD法による圧電体膜のセンサー
- AD法による高透明・金属・誘電体ナノ複合膜
- AD法による圧電駆動型
- AD法が築く未来生活の世界
- AD法による圧電駆動型
- ADの実際の製造機
- ADでのインダストリアル
- プラズマのアシストによる成膜
- EO/MO材料の成膜
- 大面積への成膜
- 原料粒子の機械特性評価
- 電子デバイスへの応用
- FPCへのEM対策応用
- BaTiO3のAD法の応用
- パネルへの吹きつけ
- コーティング
- 高誘電率膜
- 電気機械応用
- 透明電気化学膜
- モジュール基板
- 装置展示
- 粒子の強度
- NEC
- NEC-キーン
- ミラー
- 小型AD装置
- 超音波モニター

アンケート集計（展示会） 大学他12

5 未来モックアップ、ビデオのご意見をお聞かせ下さい。

- なかなか面白かった
- 非常に興味深い
- 良くわかっていいと思います

6. 今回、最も興味深かった展示物・パネル・実証実験を2つ挙げて下さい

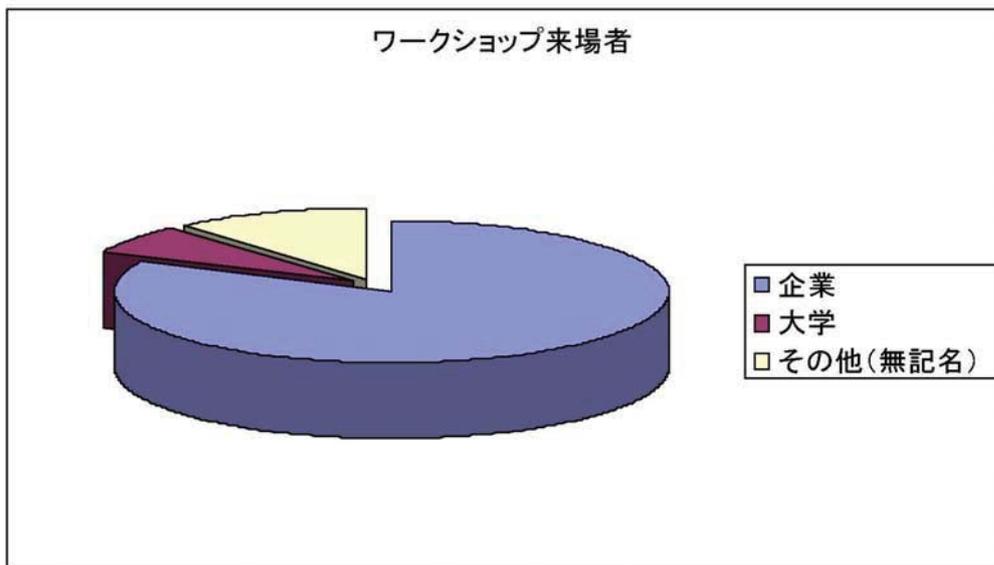
- PZT
- 光スキャン
- 超音波モーター(チューブ型)
- AD法による高透明・金属・誘電体ナノ複合膜
- AD法
- イメージングセンサー
- 受動素子内蔵基板
- AD法による各種セラミックスの成膜
- 小型AD装置

8. その他、プロジェクトやNEDO、産総研、製造科学技術センターなどのご意見、今後の本プロジェクトへのご要望など

- これからも頑張ってください

## ワークショップ来場者

企業	大学	その他(無記名)	
36	3	5	44



アンケート集計(ワークショップ)

① a案内状 bホームページ cその他 回答なし

企業分	5	25	6	0	36
大学その他分	1	1	1	0	3
無記名	1	3	1	0	5

② aはい bいいえ 回答なし

企業分	25	11	0	36
大学その他分	3	0	0	3
無記名	3	2	0	5

③ aはい bいいえ 回答なし

企業分	30	5	1	36
大学その他分	3	0	0	3
無記名	4	1	0	5

④ a今すぐ b近い将来 c当分は d検討する 回答なし

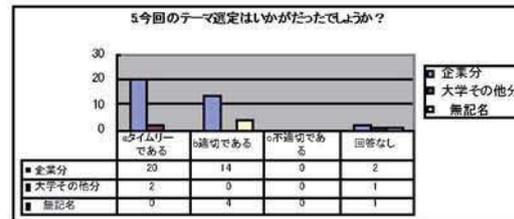
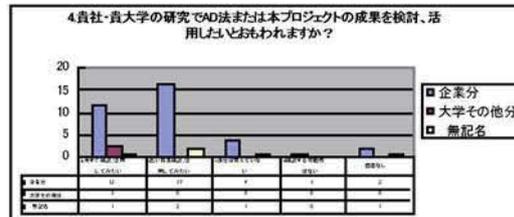
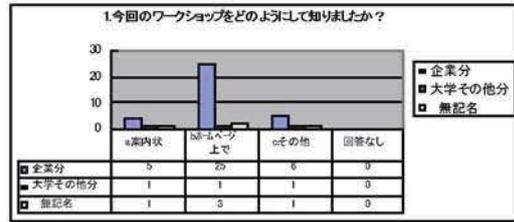
企業分	12	17	4	1	2	36
大学その他分	3	0	0	0	0	3
無記名	1	2	1	0	1	5

⑤ aタイムリー b適切である c不適切である 回答なし

企業分	20	14	0	2	36
大学その他分	2	0	0	1	3
無記名	0	4	0	1	5

⑦ aはい bいいえ cどちらとも 回答なし

企業分	32	0	2	2	36
大学その他分	2	0	0	1	3
無記名	2	0	1	2	5





## アンケート集計（ワークショップ）

無記名

6. 今回、最も興味深かった講演を2つ挙げて下さい

- ・ADプロセスのRFモジュール
- ・ホログラムメモリー
- ・電磁波吸収体
- ・東工大・・・鶴見先生
- ・富士通・・・今中氏
- ・ミリ波アニール
- ・RFモジュール

8. ご意見・ご要望  
・記入なし

## 第5章 ADMにかかわる特許

本節では、AD法に関わる特許の出願状況の調査結果について述べる。図5.1は「エアロゾルデポジション」を検索項目にして検索した出願数の推移である。

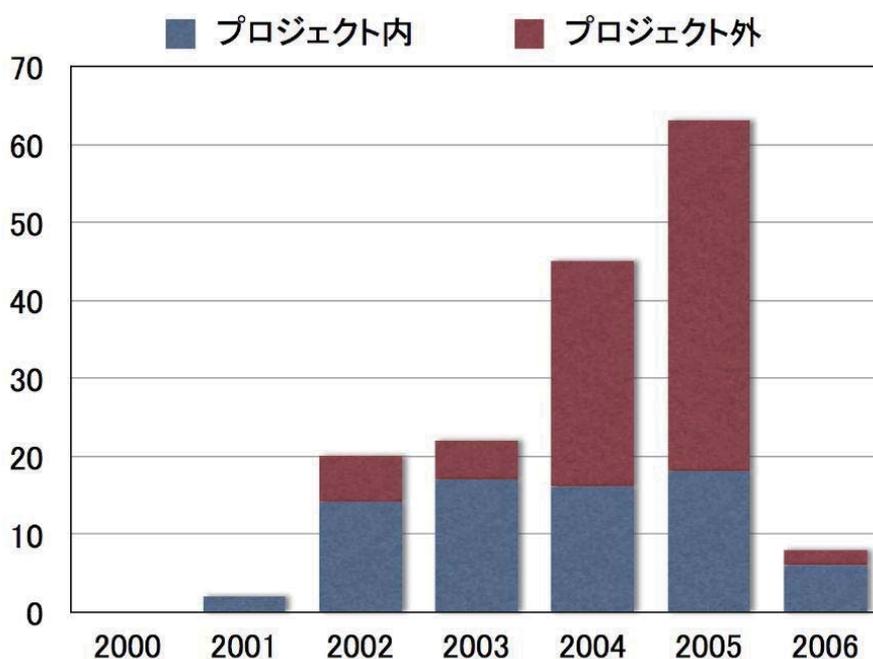


図 5.1: 「エアロゾルデポジション」を検索項目にして検索した特許出願数（2007年3月時点で公開されたもの）の推移

産総研で発明されたまったく新しい技術であり、ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクト（以下、プロジェクトと呼ぶ）において、産総研とその共同研究企業・機関を中心に研究が実施されてきた。従って、「エアロゾルデポジション法」という術語が周囲に認知されてきたのも最近のことである。図5.1でもわかるように、2000年以前には、「エアロゾルデポジション」という術語は特許申請の中には入ってこなかった。プロジェクトが開始された2002年度には、「エアロゾルデポジション」という術語が含まれる申

請が、各プロジェクト内企業・機関からなされるようになり、以後プロジェクトの進展とともに、同様な数の出願が毎年されていることがわかる。それと同時に、プロジェクト外の企業・機関からの出願が見うけられるようになり、新しいプロセスである「エアロゾルデポジション法」が術語として広く認知されてきたことがわかる。プロジェクトの進展とともに、(特に2004年以降)プロジェクト外からの特許申請が飛躍的に増加しており、AD法が単に学術的な注目をあびているだけでなく、産業応用に向かったの取り組みが進んできていることがわかる。

次に、特許の傾向について分析してみた。これら特許が、主にプロセスに関するものかデバイスに関するものかについて調べた結果を図5.2に示す。

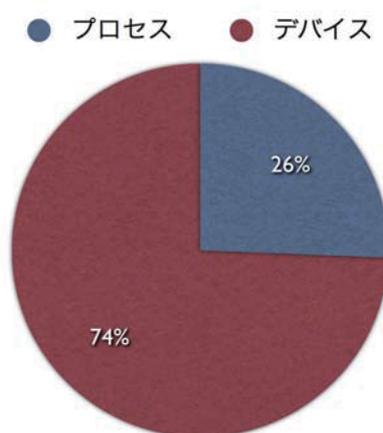


図 5.2: プロセスに関する特許とデバイスに関する特許の比率

およそ、4分の1がプロセスに関する特許、特定のデバイスを目指した特許が4分の3となっている。新しい技術にもかかわらず、すでに非常に多くのAD法を利用したデバイスに関する特許が出願されており、事業化に向けての取り組みがなされていることがわかる。

次に、デバイスに関する特許のうちどのような分野の応用が図られているかをおおよそ分類した結果を図5.3に示す。

プロジェクトでの応用分野での、圧電や電気・電子応用分野での出願が目立つが、機械やエネルギーなど、プロジェクト以外の応用分野での出願も見られるようになってきており、これら分野での取り組みが今後盛んになってくるものと想定される。

以上、特許出願からみたAD法は、すでに術語として定着をはたし、実用をにらんだプロセスとして各分野から注目されていることが確認された。

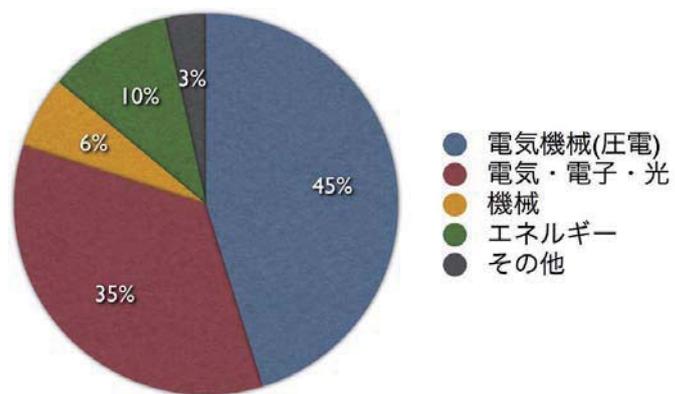


図 5.3: 出願特許の応用分野

## 第6章 次期テーマに向けた提言・課題（明渡 PLコメント）

今回、nanotec2007の展示会来場者やワークショップ参加者からの意見や各種素材等業界のを行った結果、ADMに対する興味は深く、何れも日本の製造技術の根幹を大きく変える可能性を秘めていることがよく理解できた。

そのため、それらの件を踏まえ新たなプロジェクト提案として「オンデマンド生産システム」に関する開発を提言しその中でADMは生かされるものと考えている。

AD法に関連する国内企業の特許出願の動向や過去5年間に産総研に寄せられた技術相談（延べ300件）内容の分析などから、ナノ電子セラPJで取り上げたIT・情報関連機器以外で市場規模の大きさや将来の日本の製造技術の方向性を勘案しAD法の普及と戦略的な活用として、下記の提言をまとめる。

これまでの調査でもわかるように、AD法は、非常に対象の広いプロセス技術であり、産業において幅広い基盤技術を育成するという横系的課題の解決を目指すテーマが非常に有望視されると同時に、AD法の優れた特性をいかし、AD法を導入することによって、特定対象に対して、大きなブレークスルーをもたらすような、縦系的課題にたいしても有望なテーマがあるものと考えられる。以下にその候補例を挙げる。

### （横系的課題）

- 省エネ、オンデマンドプロセスや新規希元素代替材料の薄膜化を目指したサステナブルな製造技術の実現

### （縦系的課題：対象技術）

- 照明機器やディスプレイデバイス（FDP、プロジェクター）などに関する光学機能部材への応用展開

- 燃料電池、リチウム電池、熱伝変換素子、パワーデバイスなどのエネルギー関連部材への応用展開
- 耐食、耐磨耗性と高潤滑性に優れた機械構造関連部材への応用展開
- 生体インプラント、義歯などの医療福祉分野向けの生体親和性、審美性コーティング
- デザイン性と機能性を両立できる高機能装飾用コーティング

(根幹となる技術課題と研究スキーム・体制の充実)

- 更なる AD 法のプロセスコスト低減のために原料粒子利用効率の向上や量産技術高度化を目指した基盤的研究開発の必要性

基盤的研究開発の必要性

- AD 法を活用した企業主体による提案公募型の研究スキーム
- AD 法による準非公開の研究フォーラムの形成
- 更なる調査研究の絞込みの必要性