

エアロゾルデポジション法

—— 高機能部品の低コスト、省エネ製造への取り組み ——

明渡 純*、中野 禪、朴 載赫、馬場 創、芦田 極

エアロゾルデポジション法 (Aerosol Deposition method: AD 法) は、最近開発された粉末材料の噴射加工技術の1つであり、セラミックス微粒子を高温で焼結することなく、常温で固化・緻密化できる革新的なコーティング手法である。これにより、機能部品の製造プロセスにおいて、高機能化と大幅なエネルギー消費の低減、工程数の削減、ひいてはコストダウンをもたらすと期待される。このような AD 法の持つ特徴が、技術競争力と環境負荷低減という観点から、どのように位置づけられ、また、どのような可能性を持っているかを原理や具体的検討事例とともに、本格研究の視点から検証する。

1 はじめに

電子デバイス、実装分野における製造プロセスを取り巻く状況は、産業自体のグローバル化や環境負荷への懸念の流れの中で急速に変化してきている。製品サイクルの短期化や多品種・変量生産への対応である。現在、製品マーケットでは、急速に製品仕様の多様化が進んでおり、この波は、コネクタやセンサ、アクチュエータなどの実装品レベルにも波及し、一括大量生産の時代から極端な短納期、多品種・変量生産が要求されている。つまり、製品製造に要求される形態が市場ニーズの多様化により大きく変化してきているのである。例えば、MEMS デバイスを量産する製造ラインは、既存の LSI 製造ラインを利用しても、研究開発フェーズの段階から、現状で優に 10 億円以上の設備投資が必要で、製品開発に時間がかかる上、デバイスレベルで量産効果による低コスト化のためには、相当数の生産量が求められる。それゆえに、これを事業化する際のビジネスリスクは大企業といえども相当なものになる。これが、「MEMS 事業化にはキラーアプリが必要」といわれるゆえんである。一方で、MEMS デバイスなどは、一種の部品と考えられ、その実用化を考えると、本来、多品種・変量的な生産のフレキシビリティが求められるものだともいえる。仮説ではあるが、一般的に機能部品のモジュール化においても、集積度が増すにつれ、この傾向は高まると考えられ、製品競争力維持のためにコモディティー化を抑える観点からブラックボックス化とカスタム化を同時的に押し進めると、おのずと多品種・少量生産の必要性が生じ、この

中で低コスト化を実現するには、製造技術の観点からさらなるプロセス技術の進化も必要になると考えられる。

また、これからの先端デバイスの製造プロセスを考えると、多様な機能を持つ酸化物エレクトロニクス材料などを薄膜化、高集積化して高度な機能を実現することが、ますます求められるであろう。MEMS デバイスのような電子デバイスの集積化プロセスにおいては、スパッター法や CVD 法に代表される真空薄膜プロセスを多用する研究開発が各所で進められており、今後ますますこの流れは主流となるであろう。しかしながら意外なことに、このような半導体周辺部品の集積化で薄膜技術が実用レベルに到達しているものは数少ない。これは、キャパシタやフィルター部品の事例に見られるように、デバイス化したときの材料レベル

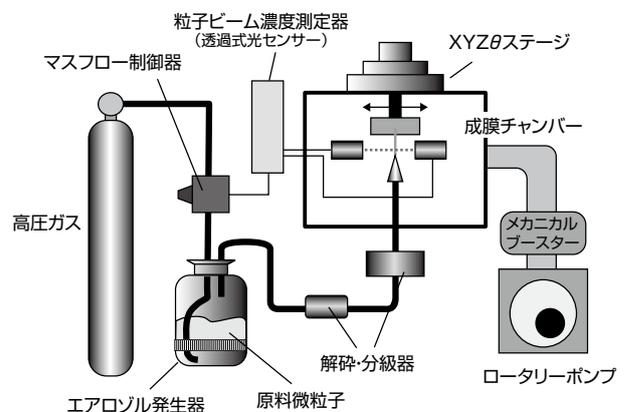


図1 エアロゾルデポジション (AD) 装置の基本構成

での特性と製造プロセスコストがトレードオフの関係になりがちで、現時点ではバルク材料を工夫、加工し利用するほうがコスト、設備、エネルギー消費面で現実的なことが多いということに由来する。真空プロセスでは、純度の高い原材料と超高真空の環境が求められており、これを量産レベルで実用化するには、設備コストやエネルギー消費、環境負荷などの観点から懸念される課題が多々あり、これをブレイクスルーすることも重要な課題になると考えられる。その意味で、これらに対応できるオンデマンド的な製造プロセスや製造システムの構築は、環境負荷低減という観点のみならず、産業競争力の強化という観点からも、今後、重要な課題になると考えられる。実際このような課題への検討は、センサデバイス用回路基板の実装などアセンブリレベルでは、小規模なセル生産システムという形で始まっている^[1]。

以上のような高機能デバイス製造を取り巻く環境の中、「どう機能を実現するか?」だけでなく「どのような作り方で実現するか?」という研究開発の視点もますます重要になる。本論文では、このような視点に立ちエアロゾルデポジション法をベースとしたオンデマンド製造プロセス実現の可能性を検討した。

2 エアロゾルデポジション (AD) 法とは

エアロゾルデポジション法 (以下 AD 法)^[2] は、あらかじめ他の手法で準備された微粒子、超微粒子原料をガスと混合してエアロゾル化し、ノズルを通して基板に噴射して被膜を形成する技術である。ガス搬送により加速された原料粒子の運動エネルギーが、基板に衝突することにより局所的な熱エネルギーに変換され、基板-粒子間、粒子同士の結合を実現するものと考えられてきた。しかしながら、そのエネルギー変換のメカニズムは十分理解されているとは言いがたかった。

図1に成膜装置の基本構成を示す。この装置は、細い搬送チューブで接続されたエアロゾル発生器と成膜チャンバーから構成され、成膜チャンバーは真空ポンプで50～1 kPa前後に減圧される。原料であるドライな微粒子、超微粒子材料は、エアロゾル発生器のチャンバー内でガスと攪拌・混合してエアロゾル化され、両チャンバー間の圧力差により生じるガスの流れにより成膜チャンバーに搬送、スリット状のノズルを通して加速、基板に噴射される。原料微粒子には、通常、機械的に粉碎した粒径0.08～2 μm程度のセラミックス焼結粉末を用いる。ガス搬送された超微粒子は、1 mm以下の微小開口のノズルを通すことで数100 m/secまで容易に加速される。成膜速度や成膜体の密度は使用するセラミックス微粒子の粒径や凝集状態、乾燥状

態などに大きく依存するため、エアロゾル発生と成膜チャンバーの間に凝集粒子の解砕器や分級装置を導入し、高品位な粒子流を実現している。

最近、このAD法でセラミックス原料粉末を用い、その粒径、機械特性等を調整し適切な成膜条件を選ぶと、図2に示すように高密度かつ透明なセラミックス被膜が常温で高速形成できる常温衝撃固化現象 (Room Temperature Impact Consolidation: RTIC)^{[2] [3]}が見出された。原料微粒子を基板に吹き付けるときに基板加熱や成膜後の熱処理は行っていない。また、この現象は、セラミックス材料だけでなく金属材料でも同様に生じる。

AD法による常温衝撃固化で形成したセラミックス膜の微細構造は、結晶粒子間にアモルファス層や異相はほとんど見られず、いずれの場合も室温で10～20 nm以下の無配向な微結晶からなる緻密な成膜体が得られている。また、10 nm以下の微結晶内にも明瞭な格子像が確認され、膜内部には歪みなどを含むものの、膜組織は基板界面から膜表面に至るまで均一な構造である。さらに、いずれの場合も原料微粒子は平均粒径で80～100 nm以上の単結晶構造であるが、形成された膜ではより小さな微結晶組織になっている。XRDやEDX分析の結果からも、形成された膜は組成変動も少なく原料微粉の結晶構造をほぼ維持している。粒子速度の測定、運動エネルギーの評価などから粒子衝突により原料粒子結晶が機械的に破碎、塑性変形することで微細化され、同時に粒子間結合も生じることでナノ結晶薄膜が形成されると考えられる^{[1] - [3]}。従来の粒子衝突を利用したコーティング手法では捉えられていなかった観点である。

以下に従来薄膜プロセスと比較したAD法の特徴をまとめる。

1. 常温、バインダーレスで緻密な成膜/成形体が得られる。
2. 高い成膜レート (5～50 μm/min)
(従来成膜法: 0.01～0.05 μm/min)
3. 蒸気圧の大幅に異なる複雑組成系に対し使用粉末と同一組成・結晶構造の成膜体が得られる。

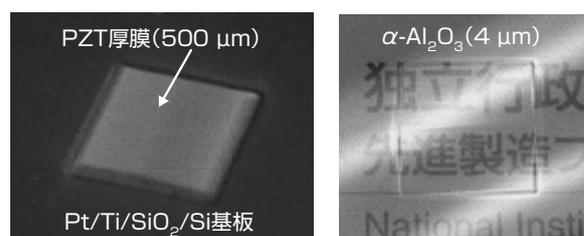


図2 AD法で常温形成されたセラミックス膜

4. 広範囲の膜厚が得られる。(0.5 μm ~ 1 mm)
5. 直接描画、マスク法、リフトオフ法などにより微細パターンが膜のエッチング加工無しで得られる。
6. 低真空(数 100 Pa 程度~大気圧) で成膜可能。

AD 法で常温衝撃固化された膜は、衝突による基板温度の上昇も一切観察されず、マクロ的には室温でセラミックス材料を固化できている。焼成工程を経っていないので一種のバインダーレス超高密度セラミックグリーンとも言える。

3 既存薄膜技術との比較と省エネルギー効果

3.1 従来の薄膜技術との原理的相違

低温で緻密性や結晶性の良いセラミックス膜が精度良く低コストで高速形成できれば、冒頭に上げたデバイス量産上の問題は解決する。AD 法は熱非平衡なプロセスで、溶射技術などと異なり原料微粒子をほぼ固体状態のまま常温で結合・薄膜化する。従来の薄膜法と比較した場合、粒子単位のビルドアップ加工であるため成膜速度は非常に速く、原料微粒子の結晶構造が成膜体でも、ほぼ維持される。このため、基板材料を選ばず、複雑組成の複合酸化物などの薄膜化が容易であることなどの大きな特徴がある。従って、他の成膜技術に比較して大幅なプロセス温度の低減が期待でき、本質的に異種セラミックス材料、金属材料、ポリマー材料との複合・集積化やナノ組織複合材料の開発に向くと考えられる。

プロセスの省エネ化という観点では、通常、数 100 Pa 以上の低真空環境下で成膜可能で、対象材料や使用目的によっては大気中でも成膜可能なことが最も大きな特徴である。一般に、従来の薄膜技術では、原材料を原子・分子レベルにいったん分解し、これを基板上で結晶成長させる。このため欠陥の無い高純度な結晶組織ひいては高性能な膜特性を得るには、基板到達前の状態で不純物原子などとの吸着、結合を抑制するために周囲環境を超高真空にする必要がある。これに対し AD 法では、図 3 に示すように、原材料はすでに結晶化した粉末で、基板への材料供給速度が速いだけでなく、基板到達前は原材料である微粒子表面は不活性で、基板衝突して初めて活性化粒子間結合が生じる。このため、高真空環境でなくとも、成膜過程で過剰な不純物を膜内に取り込むことがかなり抑えられる。厳密には、原料粉末表面には不純物吸着が残存するため、超高純度な結晶を得るには、表面を事前にクリーニングする必要があると考えられるが、このような処理が無くとも、多くの電子セラミックス材料に対して、既存の真空薄膜技術と同等かそれ以上の膜特性が得られることが、NEDO ナノテクノロジープログラム/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 (FY2002 ~ FY2006)^[4]の中で実証されている。

この様に、高機能な材料に対し、ロータリーポンプでの排気程度の低真空プロセスで成膜できる点は、工業的側面では画期的と考えられ、原理的に従来の真空薄膜プロセスと比較すると、製造設備導入コストやエネルギー消費量の削減、環境負荷の大幅な低減につながると考えられる。

3.2 静電チャック製造工程におけるAD法導入の省エネルギー効果

実際に、AD 法を導入することで、製品製造全工程での消費エネルギーがどの程度削減され、製品機能がどの程度改善されるかを、民間企業との共同研究を通して NEDO エネルギー有効利用基盤技術研究開発プロジェクト(省エネ先導研究: FY2001 ~ FY2003)^[5]の中で検討した。対象としたのは静電チャックである。これは現在、半導体製造においてウエハを吸着ハンドリングする装置として多用されており、フラットパネルなど大型部材を保持できる高い吸着力の製品が求められている。静電チャックは、図 4 に示すように放熱と電極をかねた金属ジャケットに静電気力を発生するためのセラミック薄板が絶縁層として貼り付けられた構造になっている。このセラミック薄板の厚さが薄いほど印加電圧あたりの吸着力が増す。また、放熱性の観点から、一般に熱伝導性の良い窒化アルミ系材料が用いられている。プロジェクトでは、この窒化アルミの薄板を AD 法による金属ジャケットへのセラミックコーティングに置き換え、性能向上と全製造工程でのエネルギー消費削減効果を検討した。性能面では、絶縁層厚みをコーティングに置き換えることで 1/10 以下に薄くでき、このことで印加電圧あたりの吸着力を約 20 倍まで向上でき、さらに金属ジャケットへの熱伝導や吸着応答速度を大幅に上げることができた。また、付加的機能として熱伝導向上を窒化アルミと

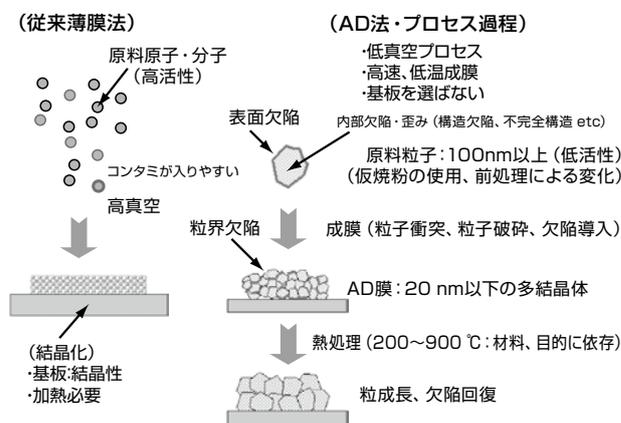


図3 AD法と従来薄膜法のプロセス過程の違い

いう材質に頼らなくとも実現できるため、材質をイットリアなどに切り替え、プラズマ耐食性を向上できるなどの新たな機能面の改良がはかれた。

この静電チャックの製造をAD法導入による消費エネルギー削減の観点から検証すると、図4に示すように製造工程トータルで約80%ものエネルギー消費量の削減が可能ながわかった。また、製造工程時間も1/10以下に抑えられている。このエネルギー削減について分析すると、非常に興味深いのは、単純に従来の工法でメインとなる焼成工程でのエネルギー消費が1000℃以上の高温から一気に室温になったという点だけでなく、製品製造の全工程数が減り、特に静電チャックの製品性能を決める吸着面の平坦性を出すための研磨工程でのエネルギー消費が大幅に減ったことが、全体のエネルギー消費の低減に大きく貢献している点である。従来の窯業プロセスでセラミック薄板をつくと、焼成時の収縮や反りがどうしても大きくなり、これを平坦化する工程でのエネルギー消費が意外にも大きいのである。AD法によるセラミックスコーティングを用いると、膜厚を薄くしても緻密なため十分な耐圧があり、また、薄い膜厚のため吸着面の反りは大幅に低減される。製造工程のエネルギー削減は量産設計の考え方とも深く関与しており、これらをトータルに考慮し、AD法の省エネプロセス技術としての有効性を検証すべきと考える。

以上の事例は、静電チャックという特殊な部品であるが、

その他の窯業製品においても、おおよそセラミックスに求める機能が耐食性や絶縁性、硬度などその表面だけが重要な用途では、AD法によるセラミックコーティングに置き換えることにより同様のエネルギー削減の効果が期待できる。

このほか、最近では、AD法で成膜されたイットリア膜を耐食プラズマコーティングとして半導体製造装置のチャンバー内壁や要素部品に適用することにより耐久性を向上させる用途展開が事業化されつつある。これまで材料ごとに装置が必要であったCVD工程を1台の装置でまかなえるようにしようとする検討も始まっている。半導体製造工場の規模や設備コスト、エネルギー消費を生産量に合わせて最適化できる可能性も考えられる。

4 MEMS光スキャナーへの適用における低コスト・省エネ化の可能性

4.1 Si-MEMSスキャナーへの適用と工程の単純化

「必要とところに必要なだけ」あるいは「多品種変量」という要求にこたえる考え方として、プロセスや製造システムのオンデマンド化の検討をおこなった。AD法はノズルからの噴射加工ということもあり、インクジェット技術のようなオンデマンドプロセスとしての可能性も持ち合わせている。

具体的な事例として、図5に示すような圧電駆動型の

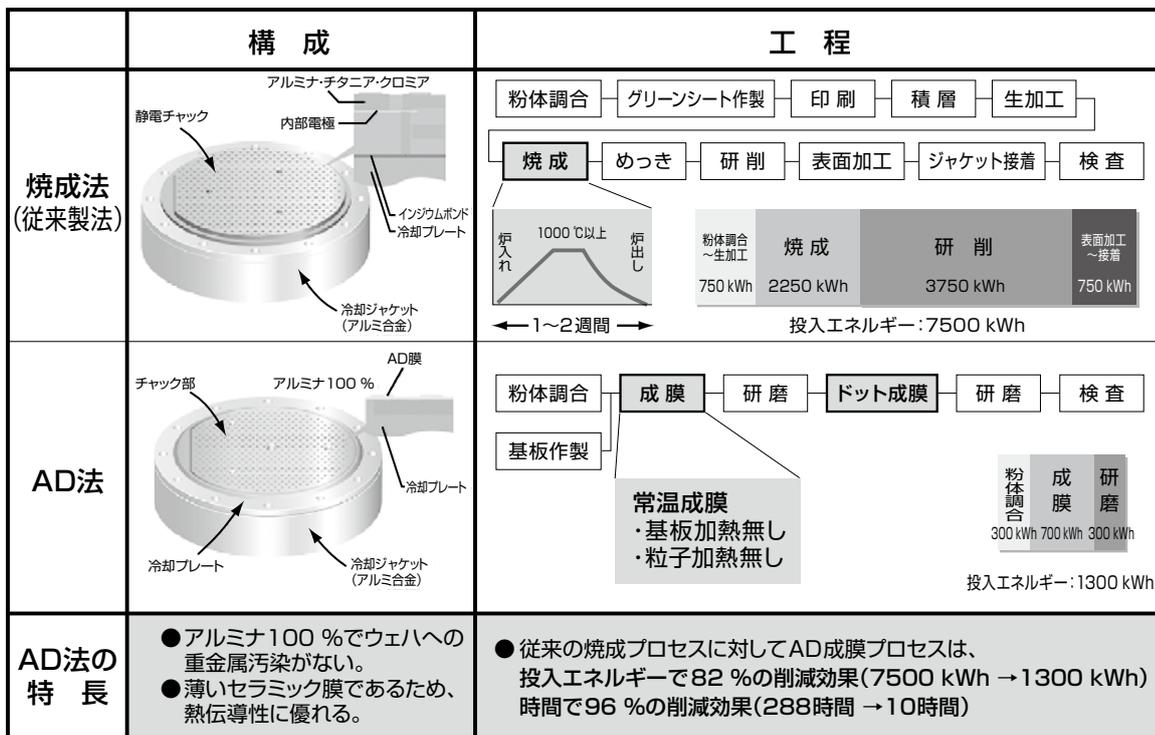


図4 静電チャックの構造とAD法導入による製造工程のエネルギー消費比較

Si-MEMS 光スキャナーへの適用を検討した。このようなスキャナーは、次世代レーザープリンターやバーコードリーダ、ITS 用レーザーレーダなどへの応用、さらにはマイクロプロジェクターや網膜投射型ディスプレイなど次世代表示デバイスのキーコンポーネントとして広範囲の応用展開が期待され、数 10 kHz 以上の高速走査と 20° 以上の大振幅動作、ミリメートルサイズのミラーと動作時の撓み（歪み）の低減や低電圧駆動が要求されている^[6]。

このデバイスの製造工程では、まず Si マイクロマシニングでスキャナー構造を形成し、駆動源となる圧電膜を必要な部位にだけ形成する。従来、このようなアクチュエータ構造を形成するには、ウェットやドライエッチングによるバルクマイクロマシニングで構造形成し、スパッター法や CVD 法、ゾルゲル法などを利用し上部・下部電極層や圧電層の堆積を行うが、圧電層の形成に基板加熱が必要となる。また、成膜材料の構造側面への回り込みを避けるため、工程数の少ないリフトオフ法やマスク法は用いられない。この時、各材料層を堆積するついでエッチングによりパターニングを行うことになり、高価な微細加工装置や成膜装置と 20 工程以上のプロセスが必要であった。これに対し、AD 法を用いた場合、微細加工された Si のスキャナー構造上の必要な箇所だけに圧電膜を精度よく形成できるので、圧電膜や電極層のエッチング工程が不要になり成膜速度の向上と相まって大幅な工程短縮や設備導入コストの低減が可能となっている。性能面では、走査周波数：33.4 kHz、光ビーム走査角 30° という結果が得られており、従来の静電駆動型 MEMS 光スキャナーや電磁駆動型 MEMS 光スキャナー、圧電駆動型 MEMS 光スキャナーを超える高速、大振幅走査の光スキャナーが実現できた^[7]。これは、圧電

膜の厚さをプロセス上簡単に厚くでき、その結果、駆動源の発生力が大きくなり、剛性の高い Si ねじれ梁構造を採用できたためである。

4.2 メタルベースMEMSスキャナーへの展開とデバイス設計への反映

AD 法が基板材料を選ばず高性能な圧電膜が形成できる点に着目し、より安価で耐衝撃性に強く実用的な小型アクチュエータを目指して、メタルベースのデバイス化を検討した^[8]。図 6 は、図 5 に示した MEMS 光スキャナーに対し、スキャナー部本体を Si からステンレス基材に置き換え、パンチ加工による打ち抜きでミラー部、ねじれ梁部などを含むスキャナー構造全体を形成し、これに AD 法で圧電膜を直接形成して製作された、板波共鳴型の高速マイクロ光スキャナーの製造工程である。基板部に形成された AD 圧電膜が外部電界で伸縮運動することにより、基板全体に曲

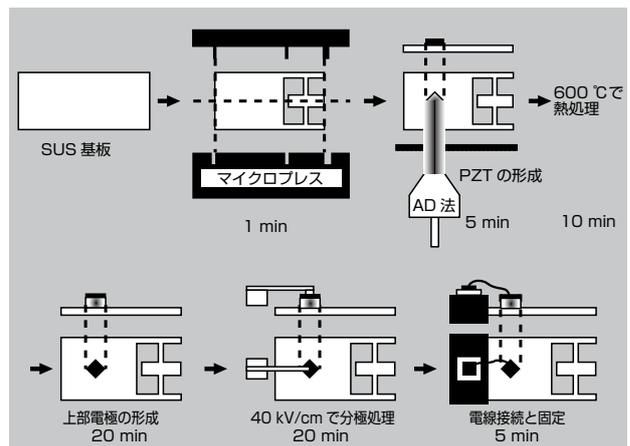


図6 AD圧電膜で駆動されるメタルベース光スキャナーと製造工程

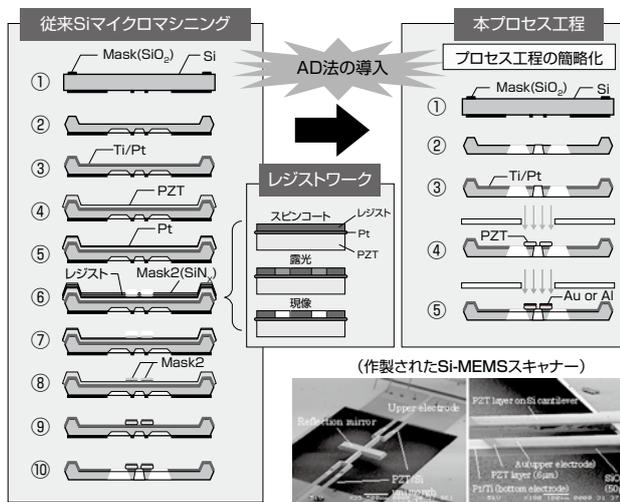


図5 AD圧電膜で駆動されるSi-MEMS光スキャナーと従来製造工程の比較

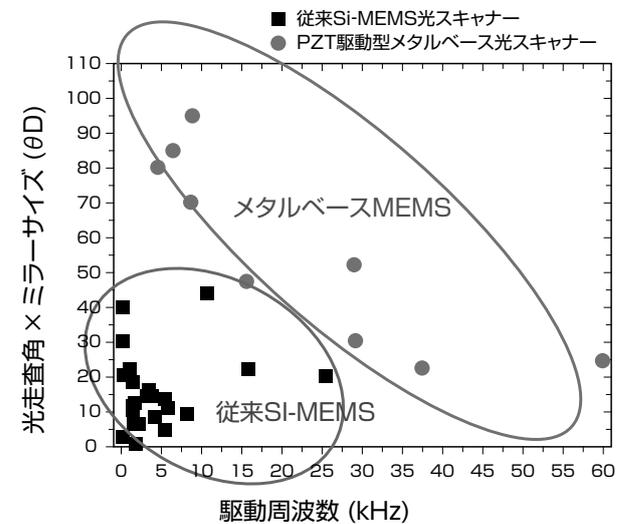


図7 板波共鳴原理によるメタルベース光スキャナーと従来Si-MEMSスキャナーとの性能比較

げ変位が誘起され（ユニモルフアクチュエータとして働き）、板波を発生させ、これでミラー部を共鳴励振してミラー部で反射したレーザー光を高速走査する。図7に従来のSi-MEMSで製作された光スキャナーとの性能比較を示す。同一駆動電圧で比較されており、横軸は共振周波数、縦軸はミラーサイズ×光ビームの走査角度で、ミラー部振れ角の標準的な評価指標である。共振周波数は空気中で100 Hz～90 kHzと広範囲に設計でき、光ビームの走査角度も最大95°が得られた。また、超精密研磨加工されたステンレス板材を用いることで、パンチで打ち抜き加工されたミラー部も2 mm角サイズに対し、 $\lambda/4 \sim \lambda/8$ 程度の平坦性が得られており、本光スキャナーの用途に適応できるレベルにある。Siウエハを素材として用いた場合、このような大きなミラー走査角度を、10 kHz以上で実現することは、降伏限界を超えたねじれ梁の破損や共振周波数の低下により実現困難である。図8に示すように、最大走査周波数：61 kHz、最大光ビーム走査角：75°で1年間以上の連続動作試験の結果、共振周波数の低下や光ビーム走査角度の劣化はみられず金属疲労という観点からも実用的な耐久性を有することが確認された。また、ステンレス素材を用いることで、耐衝撃性を大幅に向上することができ、モバイル機器、車載装置への応用が期待できる。さらに、スキャナー構造がステンレスであるので、それ自体を下部電極にできるため、スパッター法などによる3層構造の下部電極形成工程が省かれて製造工程は大幅に簡略化され、設備導入コストが従来のSi微細加工設備と比べて低く抑えられることなどでデバイスの低コスト化が期待される。

以上の結果から、大走査角の高速光スキャナーの実現という課題に対し、AD法が金属基板上に良質の圧電膜^[9]を直接形成できる点を最大限に生かし、かつ、従来機械加工技術と組み合わせることで、シリコンマイクロマシン

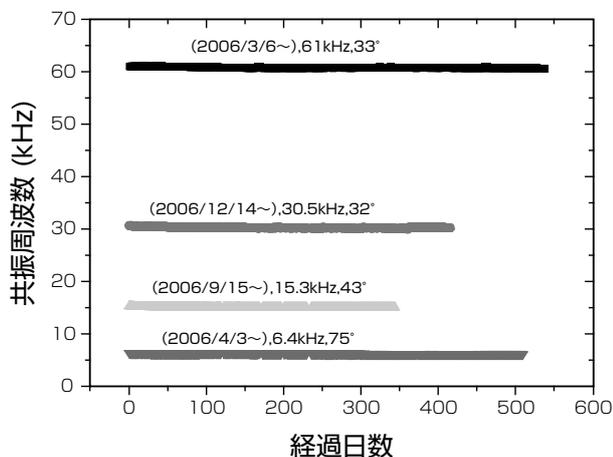


図8 メタルベース光スキャナーの耐久性

グをベースとした従来の設計思想を凌駕しうる高性能化と低コスト化が両立できることが確認できた。

4.3 多品種・変量製造システムへの適用

先の光スキャナー製造上のAD法の有効性を生産レベルで検証することと、カスタムメイドが要求される医療用マイクロデバイスなどさらに多品種・変量的な生産が要求されるセンサ、アクチュエータ部品に応用展開するための試みとして、図9に示すような機械加工の迅速、多様性とAD法やレーザー加工、インクジェット法など、オンデマンド性の高い機能材料の形成・加工技術を駆使した製造システムの開発を行った。電子機能デバイスの製造工程にもかかわらず、マスクレスで多品種・変量生産に対応できる製造プロセスを目指した仕様となっている。以下にその構成要素の詳細と検討結果を述べる。

AD法は、その原理の単純さから装置スケールをロールツールからデスクトップ規模まで容易にスケール変化さ

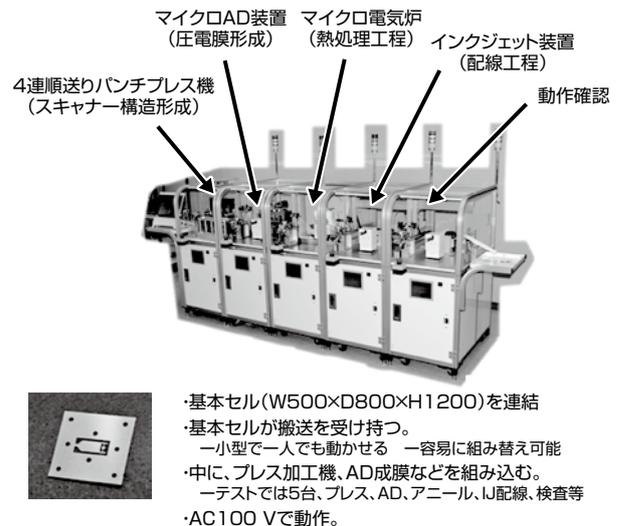


図9 オンデマンドMEMS製造システム

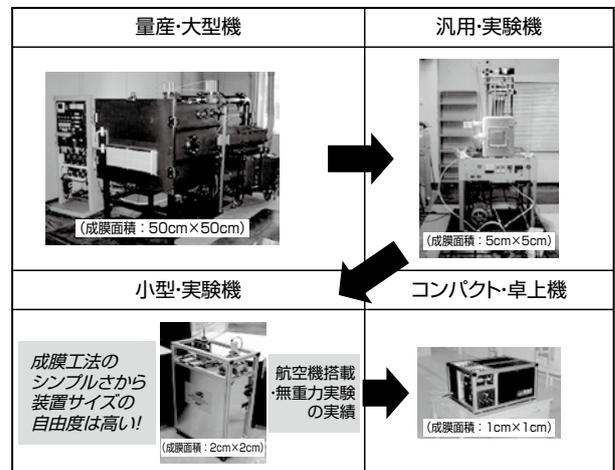


図10 様々なサイズのAD装置

せられる可能性を秘めている。図10は様々な大きさに対応したAD装置の試作例である。現状で最も大きいサイズは、50 cm角の成膜面積に対応できる装置があり、最も小さいサイズでは、デスクトップサイズのものまで試作されている。また、このような小型AD装置は、宇宙ステーションなどに搭載することを目的に無重力航空機実験などでの成膜実績がある。注目すべきは、AD法の成膜には高真空が要求されないことと、成膜装置のダウンスケールによって、成膜チャンバーの排気、真空リーク時間が著しく低減されることが挙げられる。

今回上述のメタルベース光スキャナー製造用に試作したAD装置(図9)では、サンプルサイズとしては1デバイスが2 cm角内に収まることを想定し、チャンバーサイズを決定した。また、実際の生産システムでは、図11に示すように前後の工程との間に、サンプルの自動搬送、自動アライメント機構を必要とすることから、チャンバー蓋部にサンプルホルダーを持つ機構とし、サンプルの出し入れのタクトタイムの短縮と位置決めを容易にしている。ホルダー付のチャンバー蓋部は、圧縮空気駆動のシリンダーにより上下させる。これらの機構により搬送アームがサンプルを設置し、退避後0.2秒未満の時間で蓋を閉じて真空引きになる。

真空引きについては、AD法に必要な真空度は(成膜時)100 Pa程度を見込めれば良いことから、低真空領域での高速排気がポイントとなる。全体のチャンバー容積(ゲートバルブまで)を先のサンプルサイズに合わせて、約75 cm³ときわめて小さく設計することで、図12に示すように排気量15~20 m³/min程度の卓上型ロータリーポンプ1台で2 Pa程度までの真空到達時間が約3秒で成膜が可能にな

る。リーク時間についても約0.1 Paから0.7秒で大気圧に到達する。また、膜形成速度についてはエアロゾル化室の性能にも依存し、現在必ずしも十分ではないが、この条件下で1 μm/sec前後の成膜レートが得られている。

以上の設計により、3ミクロン厚、5 mm角のPZT厚膜の成膜では、図11に示すように装置への基板挿入→真空排気→成膜→真空リーク→基板取り出しまでの一連の工程時間が約10秒と驚異的に短縮させることができた。これは、真空プロセスはバッチプロセスで扱うという従来の常識を大きく覆すもので、オンデマンド性を具現化する重要なポイントになる。

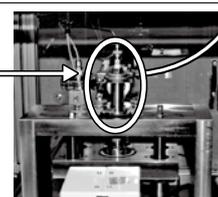
また、スキャナー本体構造の形成を行うパンチによる打ち抜き加工工程では、ミラーとねじれ梁の部位、スキャナーフレーム全体形状、位置決め穴などを4つの順送分割型にし、4台のマイクロプレス機構で順次ステンレスフープ材を打ち抜き、形状形成するような構成になっている。このことにより部分的な金型の変更、組み合わせの選択により、共振周波数の違いや、ミラーサイズの違いなど、多種類の製造に比較的安価に対応できる構成になっている。このほか、小型の熱処理装置、配線用のインクジェット装置などの工程ユニットも試作し、トータルで素材からデバイスまでの製造ができるシステムを構築した。現状では、実用的な

- ・高速成膜が可能：実際の成膜時間を削減 ~6 s
- ・常温衝撃固化現象：サンプル過熱などが不要 ~0 s
- ・必要な場所だけ成膜：チャンバーサイズが小さくなる
 - 真空引き/リーク時間が短縮 ~各2 s
 - サンプル取出(大気へ)時間も高速化 ~1.5 s

Total time(サンプル投入から取り出し可能までの時間)
~10 s



高真空必要(10⁻⁵~10⁻⁶Pa)TMP利用
低い成膜速度(20 nm/min以下)
長いタクトタイム(3~5時間)
高い基板温度(550~600℃)



チャンバー容積: ~1/2000
低真空: ロータリーポンプ1台

図11 小型化によるタクトタイムの向上

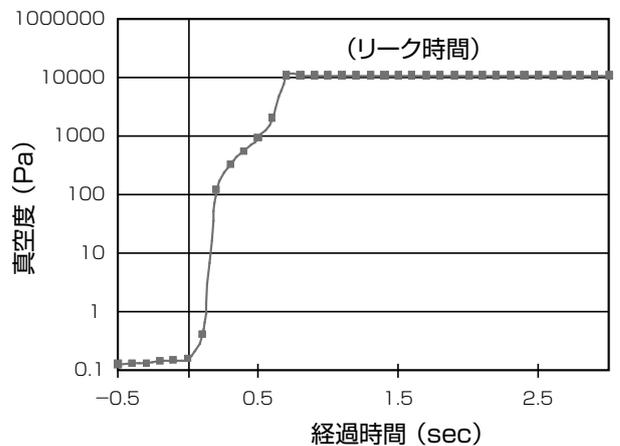
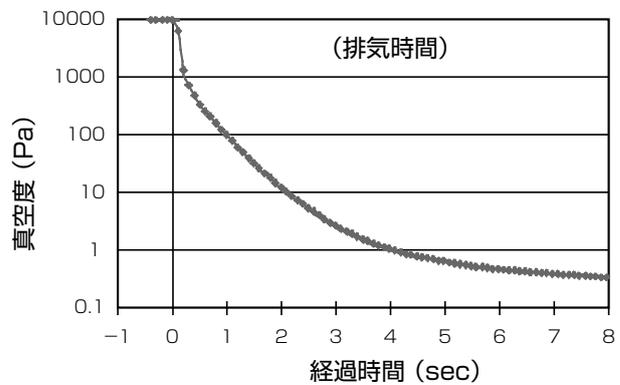


図12 小型AD装置の成膜可能真空度到達速度とリーク時間

製造装置としてはまだ多くの修正、改善が必要であるが、製造設備開発とデバイス設計の同時的な最適化、進化がはかれるところも利点と捉えている。

前節で述べたメタルベース光スキャナーは、この生産システムによる試行錯誤と計算機シミュレーションにより最適設計・製作された。その結果、1ラインあたり、1デバイス/min という生産スピードの実現に目処を得ている。これは月産約2～3万個の量産量に当たる。このような製造工程に置き換えることにより、デバイス性能を向上する中で、表1に示すように、従来 Si 微細加工設備を利用する場合と比較して、エネルギー消費、設備設置面積、製造時間の大幅な削減、環境負荷の低減が可能なが確認された。

5 まとめと将来展望

AD 法の特徴を最大限に利用し、製品性能の高機能化と低コスト化を両立させ、環境負荷の小さなオンデマンド製造技術の構築を試みる検討を行った。AD 法は、機能性材料を利用する工程において、常温成膜が可能で、高い成膜速度、エッチングレスの局所加工などの特徴を持っている。静電チャックと光スキャナー製造について検討した結果、デバイス構造、製造工程の簡略化とプロセスタクトタイムの向上、プロセス装置の簡素化という要素が有効に働き、これを元に材料、素材レベルからのデバイス設計の見直しを行うことで、性能向上と低コスト化、あるいは製造過程での環境負荷低減を両立させたものづくりが可能なが明らかになった。また、その過程で、量産装置としての改造も加えられ、製造設備開発とデバイス設計の同時的な最適化が図れるメリットもあることが判った。最小のインプット(省資源、省エネルギー)にして、高い実用性(高生産性、低コスト)を持ちながら、最大限の機能(新機能、高性能)を発揮するという「ミニマルマニユファクチャ

リング」のビジョンを示した一例といえよう。もちろん、ここで取り上げた MEMS デバイスなどは、一般的には AD 法の導入だけで効果的に最適化されるものではないが、逆に現在知られる要素プロセスに更なる進展があれば、より広い用途に対しても大幅な最適化(ミニマル化)が可能であろう。

今後は、このような思想に基づき、材料レベルからデバイス製造レベルまで見直しながら様々な新規プロセスの導入効果について検証を進めていきたい。

キーワード

エアロゾルデポジション、AD法、光スキャナー、オンデマンド、省エネ、電子セラミックス、圧電、MEMS

参考文献

- [1] 日経ものづくり編集部：部品実装にもセル方式、日経ものづくり 2007年1月号、日経BP社、93(2007).
- [2] 明渡純, M. Lebedev: 微粒子, 超微粒子の衝突固化現象を用いたセラミックス薄膜形成技術-エアロゾルデポジション法による低温・高速コーティング-, までりあ, 41(7), 459-466 (2002).
- [3] J. Akedo: Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: Densification mechanism of ceramic layers, *J. Am. Ceram. Soc.*, 89 (6), 1834-1839 (2006).
- [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構「ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術」第2回プロジェクトワークショップ講演資料, 新エネルギー・産業技術総合開発機構&製造科学技術センター(2007).
- [5] 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成16年度 NEDOエネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発「衝撃結合効果を利用した窯業プロセスのエネルギー合理化技術に関する研究開発」プロジェクト成果報告書(2005).
- [6] M. Bayer: Retinal scanning display - a novel HMD approach to army aviation head and helmet-mounted displays VII, *Proc. SPIE 4711*, Orlando, Florida, 4557(2002).
- [7] N. Asai, R. Matsuda, M. Watanabe, H. Takayama, S. Yamada, A. Mase, M. Shikida, K. Sato, M. Lebedev and J. Akedo: A novel high resolution optical scanner actuated by aerosol deposition PZT films, *Proc. of MEMS 2003*, Kyoto, Japan, 247-250 (2003)
- [8] J. Akedo, M. Lebedev, H. Sato and J. H. Park: High-speed optical microscanner driven with resonance of lamb waves using Pb(Zr,Ti)O₃ thick films formed by aerosol deposition, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, 7072-7077(2005).
- [9] Y. Kawakami and J. Akedo: Annealing effect on 0.5Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.5Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃ thick film deposited by aerosol deposition method, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, 6934-6937 (2005).

(受付日 2008.1.29, 改訂受理日 2008.3.14)

表1 MEMS製造システムとしての比較

	シリコンリソグラフィ型 MEMSファクトリ	オンデマンドファクトリ
床面積	300 m ² (付帯設備込みだと 1000 m ²)	10 m ² (1/30~1/100)
電力(kWh/年)	360000	8000 (1/45)
製造時間	約12分/1個 (プロセス時間/ウエハーあたり個数) 約1.2分/1個 (10枚1バッチ)	設計目標値 1分/1個 (1/10~1/1)
環境負荷	レジスト等捨てる材料 プロセスガス 洗浄工程	ほとんど不要 (大幅削減!)

執筆者略歴

明渡 純（あけど じゅん）

1984年早大理工学部応用物理学科卒、1988～1991年同理工学部助手をへて、1991年通産省工業技術院機械技研入所、2001年から独立行政法人・産業技術総合研究所グループ長。工学博士。大学時代に光磁気記録、光センサーの研究で材料開発からデバイス開発まで幅広く関わり、バーコードリーダーを製造するベンチャー企業で商品開発も手がける。機械技術研究所入所後、1994年頃から現在の研究（AD法）を着想。2002年から5年間、NEDO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リーダー。本論文では主にAD法とメタルベース光スキャナーの開発を担当、さらに省エネ効果の検証、全体構想の取りまとめを担当した。

中野 禪（なかの じずか）

1989年工業技術院機械技術研究所入所以来、イオン注入技術等を用いたマイクロマシン技術の開発に取り組む。材料表面の有効な機能発現を検討。2001年NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）出向を経た後エアロゾルデポジション法等の利用技術にも取り組み、微小重力実験やオンデマンド製造技術の開発に従事している。博士（工学）電気通信大学（2003年）。本論文では主に小型AD装置も含む、オンデマンド製造システム全体にわたる装置開発を担当した。

朴 載赫（ぱく じえいひよく）

2004年産総研入所。新規の光学材料開発及び光デバイスへの実用化に向け、AD法を用いた磁気・電気光学用透明ナノコンポジットに関する研究開発を行い、超高速マイクロMEMSスキャナーの実用化研究とこの光デバイスに関連したオンデマンドMEMS小型製造装置の開発も進めている。豊橋技術科学大学大学院工学研究科電子情報工学専攻修了（2003年）。本論文では主にメタルベース光スキャナーの開発を担当した。

馬場 創（ばば そう）

科学技術振興事業団プレベンチャー事業研究員を経て2003年産総研入所。NEDOプロジェクトの中で従来困難であった金属基板上の高性能圧電厚膜アクチュエーター実現のためにレーザー援用エアロゾルデポジション法の開発に従事してきた。現在はエアロゾルデポジション法を利用したオンデマンド製造及びプロセス高度化技術に関する研究を行っている。大阪大学大学院工学研究科マテリアル応用工学専攻博士後期課程修了（2001年）。本論文では主にオンデマンド製造システムの熱処理工程（レーザー援用AD法）の開発を担当した。

芦田 極（あしだ きわむ）

1998年千葉大学大学院博士課程修了後、通産省工業技術院機械技研入所。「小さなものは小さな機械で作る」というコンセプト「マイクロファクトリ」に基づいて、ポータブルファクトリなどの「小さな加工機械」の試作開発と、「小さな機械加工」を目指したマイクロ・ナノスケール機械加工技術に関する研究を進めている。本論文ではオンデマンド製造システムの開発において、共通小型ユニットセルの連結により生産ラインを自在に構築・再構築可能なシステムアーキテクチャおよび搬送装置の設計、並びに最初の工程となるマイクロプレス加工セルの開発を担当した。

査読者との議論**議論1 全体構成について**

質問（五十嵐 一男）

AD法の特徴とその適用例が製造革新に繋がることを現した論文となっており、本ジャーナルの主旨に適した内容となっています。しかし、各サブタイトルの付け方と内容の展開が必ずしも一致していないため理解を複雑化しています。適切なサブタイトルを検討することで論文タイトルにある低コスト、省エネ製造への取り組みがハッキリしてくると考えます。

回答（明渡 純）

ご指摘のとおりです。上記趣旨を汲んだ形で修正させていただきます。

議論2 AD法の導入・実用化に介在する問題点

質問（五十嵐 一男）

静電チャックの製造において、AD法を適用すると約80%の消費エネルギー削減と1/10の製造工程時間の短縮が図られたとされていますが、このような技術革新は実際の製造ラインにどの程度採用されているのでしょうか。進みつつあるのであればその辺を触れられてはどうでしょうか。一方、採用が進んでいないとしたらそれを阻んでいる要因は何かについても簡単に触れてはどうでしょうか。

回答（明渡 純）

原稿でも触れましたが、現在、プラズマ耐食コーティング部材で本格的な事業化が始まろうとしているところです。（4月13日付、化学工業日報に掲載）

工程消費エネルギーの低減や工程時間の短縮については、生産量や導入するAD装置の台数にも依存し、単純には評価できません。ここでは、企業さんの想定される設備導入コストと生産台数に基づいて換算しております。このほか省エネ性という点では製品歩留まりなど他のファクターも入り、非常に複雑で、実用化には、あくまで最終的な製品コストがどうなるかで決まると考えられます。

また、AD法のように、これまでに実績のない新規な製造プロセスの導入、実用化には、たとえ性能面、コスト面で十分に見合ったものであっても信頼性の検証には、サンプル出荷などを通して相当な時間をかける必要があり、実用化に時間がかかりました。ここで取り上げた光スキャナーでも、耐久試験に約1年半の時間を費やしております。

議論3 ミニマルマニュファクチャリングコンセプトとの対応

質問（五十嵐 一男）

まとめと将来展望において、トータルに最適化された（ミニマルな）および大幅な最適化（ミニマル化）と記載されていますが、これだけではミニマルの意味が良く理解されないように思います。これがミニマルマニュファクチャリングを指しているのであれば明確にするため注釈を加えてはどうでしょうか。

回答（明渡 純）

ご指摘のようにこの研究はミニマル化を目指したものです。その意味で、「最小のインプット（省資源、省エネルギー）にして、高い実用性（高生産性、低コスト）を持ちながら、最大限の機能（新機能、高性能）を発揮する」という「ミニマルマニュファクチャリング」のビジョン」という文言を文中に追記しました。