

製品の革新を実現する先端製造技術

Advanced Manufacturing Technologies to Achieve Innovations in Products

岡田 直忠 OKADA Naotada

東芝グループは、製品の大幅な高機能化や低コスト化の実現を目指した製品の革新につながる製造方法の取り組みを、MFD (Manufacturing technology for design) と定義し、推進している。先端製造技術を適用することで製品の設計や作り方を変え、製品の機能向上や低コスト化を実現するとともに、従来と同等以上の製造プロセスの安定性や速度を維持することが求められる。

東芝グループは、金型を使用しない造形技術として、大型部品を高速で造形できるレーザーメタルデポジション (LMD) 方式を採用した金属3D (3次元) プリンター試作機を開発した。また、先端素材であるナノファイバー製造技術として、量産適用に向けた、エレクトロスピンニング法による多機能ナノファイバー成膜の高速化を実現した。更に、半導体チップの小型化に対応したウエハーの切断技術として、MacEtch (Metal-assisted Chemical Etching) 法を用いたケミカルダイシングにより、ウエハー使用効率及びスループットの向上を確認した。

Manufacturing technology for design (MFD) is defined as activities for innovation in products to substantially improve performance and reduce costs by transformation of design and manufacturing methods through the adoption of advanced manufacturing technologies, while maintaining the stability and speed of the processes in conventional manufacturing technologies.

The Toshiba Group is engaged in the development of the following state-of-the-art manufacturing technologies: (1) a prototype three-dimensional (3D) metal printer using a laser metal deposition (LMD) technology for high-speed fabrication of large components without metal molds, (2) high-speed deposition of nanofibers using an electrospinning technology for the mass fabrication of nanofibers from leading-edge materials, and (3) a chemical dicing technology capable of improving wafer use efficiency and throughput using a metal-assisted chemical etching (MacEtch) technology to meet the requirements accompanying the ongoing miniaturization of semiconductors.

1. まえがき

東芝グループは、新しい製造技術を適用することで、設計や作り方を変え、製品の価値向上やコスト低減を実現する製品の革新につながる取り組みをMFD (Manufacturing technology for design) と定義して、積極的に推進している。

MFDの概念を図1に示す。MFDの手段としては、製品の材質変更、製品の形状変更、製造精度・速度の変更、製造工程の変更などがある。

代表的な製造技術を表1に示す。この中で、従来製造技術に分類されているものは、既に実用化され、多くの製品に適用されている技術である。これらの従来製造技術については、製品に対応した適正化や低コスト化などの技術開発が継続的に行われている。

一方、先端製造技術に分類されているものは、今後普及

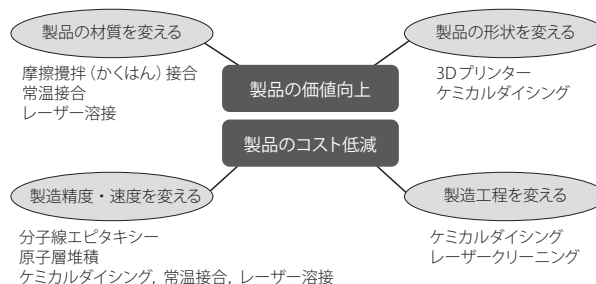


図1. MFDの概念

MFDは、新規の製造技術を適用することで、製品の材質や、形状、製造精度・速度、製造工程などを変えて製品の価値向上やコスト低減を実現する取り組みである。

Concept of MFD

していくことが見込まれる技術である。様々な新規の製造技術が研究、開発されているが、通常、新しい製造技術を製

表1. 従来製造技術と先端製造技術

Conventional and advanced manufacturing technologies

分類	従来製造技術	先端製造技術	
造形	金型を不使用	切削, 放電加工	3Dプリンター
	金型を使用	プレス成形, 射出成形, 鋳造	—
成膜, コーティング	めっき, 化学気相成長, 物理気相成長 溶射, 塗布	エレクトロスピンニング 分子線エビタキシー 原子層堆積	
切断, 除去	プレス切断, ブレードダイシング, スクライピング, レーザー切断, ドライ・ウエットエッチング	ケミカルダイシング レーザークリーニング	
接合	アーク溶接, レーザー溶接, 抵抗溶接, はんだ付け, ろう付け, 接着	摩擦攪拌(かくはん)接合 常温接合	

品に適用するには、製品の大幅な高機能化や低コスト化などの効果が求められるので、必然的に製品の設計を変更することになる。そのため先端製造技術の製品への適用は、多くの場合に製品の設計と連携したMFDとして、製品の革新に向けた取り組みになる。表1の先端技術におけるMFDとしての位置付けは、図1に示すようになる。

製品の高機能化、低コスト化に効果がある新規の先端製造技術であっても、製品への適用においては、従来技術と同等の製造プロセスの安定性や高速性が求められる。

ここでは、代表的な先端製造技術として、レーザーメタルデポジション(LMD)法による金属3Dプリンター⁽¹⁾、エレクトロスピンニング法による多機能ナノファイバー成膜技術⁽²⁾、MacEtch (Metal-assisted Chemical Etching) 法を用いたケミカルダイシング技術⁽³⁾の三つについて、東芝グループの取り組みを述べる。

2. 金属 3D プリンターによる造形

表1に示すように、金型を使用しない造形技術としては、切削や放電加工が広く用いられている。これらの技術は、材料を除去して加工するため、材料の使用効率が低く、加工できる形状にも制限がある。近年普及しつつある金属3Dプリンターは、金属粉末を積層させながら造形するため、付加製造(Additive Manufacturing)とも呼ばれている。材料を削りながら加工する手法に比べ、材料の使用効率が高く、メッシュ構造や中空構造などの複雑な形状も造形できる(図2)。ステンレス、鉄、ニッケル(Ni)基合金、チタン合金、アルミニウム合金、銅合金など、様々な材料の造形が可能である。しかし、現行の金属3Dプリンターは、造形速度、造形精度、最大造形寸法に課題があり、適用できる製

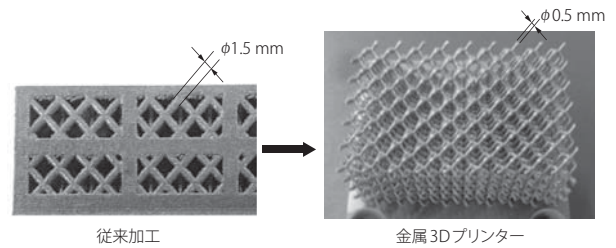


図2. 金属3Dプリンターを用いて製品を高機能化した例

金属3Dプリンターは、従来加工に比べ、より微細な金属メッシュ構造を実現できる。

Example of product fabricated for improved performance using 3D metal printer

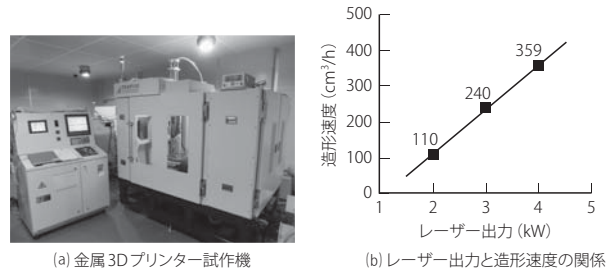


図3. 開発したLMD方式を採用した金属3Dプリンター試作機

東芝機械(株)と共同開発した試作機では、レーザー出力4 kWで高速な造形速度359 cm³/hを達成している。

Prototype 3D metal printer using LMD technology

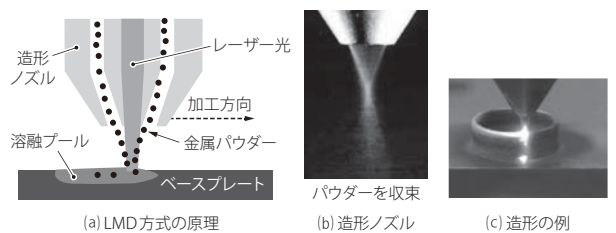


図4. LMD方式の模式図

金属粉末は、レーザー光によりベースプレートが溶融してできた溶融プールに、キャリアーガスを用いて供給される。

Schematic diagram of LMD technology

品や部品は限定的であった。

そこで、東芝と東芝機械(株)は、図3に示すように、従来に比べて10倍以上の造形速度359 cm³/hを実現できる、LMD方式を採用した金属3Dプリンター試作機を共同開発した。

LMD方式は、図4に示すように、構造物に金属粉末を噴射すると同時にレーザー光を照射することで、金属粉末を溶かしながら造形する手法である。この方式は、出

力が数kWの高出力レーザーを使用できるため、造形の高速化に適している。更に、装置全体を筐体(きょうたい)で覆う必要がないため、装置の大型化も容易である。したがって、一辺が1 mを超えるような大型部品を、高速で造形する用途に適している。

金属パウダーの材料としてステンレスやNi基合金、鉄などが使用でき、複数の材料による造形も可能である。ステンレス(SUS316L)とNi基合金(インコネル718)による複層造形(複数金属を用いた造形)の例を、図5(a)に示す。また、金属パウダーを小さく収束する造形ノズルも開発しており、SUS316Lによる約0.3 mm幅の微細なメッシュ構造を造形した例を図5(b)に示す。

これらの技術を適用した3Dプリンターは、東芝機械(株)から製品化される予定である。

この研究は、経済産業省の委託事業「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム(次世代型産業用3Dプリンタ等技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発)」におけるプロジェクト「次世代型産業用3Dプリンタ技術開発」で実施したものである。

3. エレクトロスピンニング法によるナノファイバー成膜

表1に示すように、半導体や電子部品をはじめとする様々

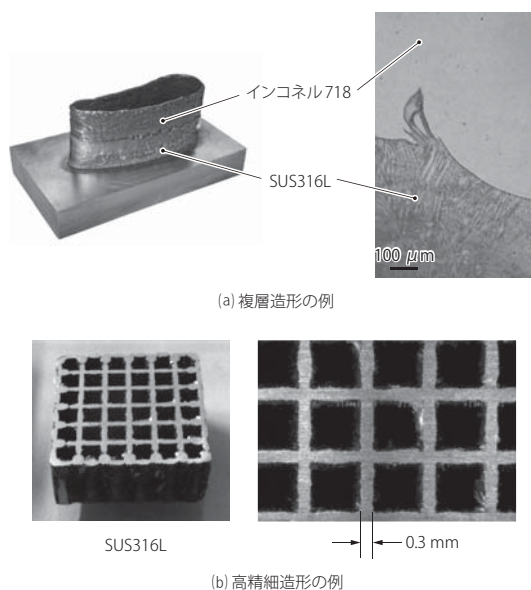


図5. 複層造形と高精細造形の例

金属3Dプリンターでは、異種金属の造形や、微細で高分解能の造形が可能である。

Examples of metal composite structure and high-precision metal structure

な製品では、めっきや、蒸着、塗布などにより、金属、無機物、有機物の膜が形成されている。東芝グループは、新しい成膜方法として、ナノファイバーの成膜技術に取り組んでいる。

ナノファイバー膜は、薄膜、高空隙率、高比表面積という特徴を持っている。図6に示すように、これらの特徴を利用して、薄型の絶縁材や断熱材が実現できたり、細胞親和性の高い再生医療用細胞培養基材や高性能フィルターなどの高機能製品が実現できたりする。

ナノファイバーの成膜にはエレクトロスピンニング法を用いる。エレクトロスピンニング法は、図7に示すように、高分子溶液(紡糸液)の入った紡糸ノズルに高電圧を印加することで、その電界によって帯電した高分子溶液を引き出して紡

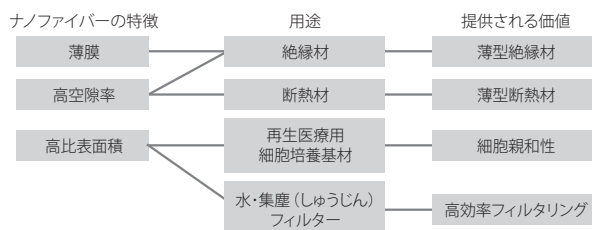


図6. ナノファイバーの特徴と提供される価値

ナノファイバーが持つ特徴を適用することによって、様々な用途で新たな価値を提供できる。

Features of and values provided by nanofibers

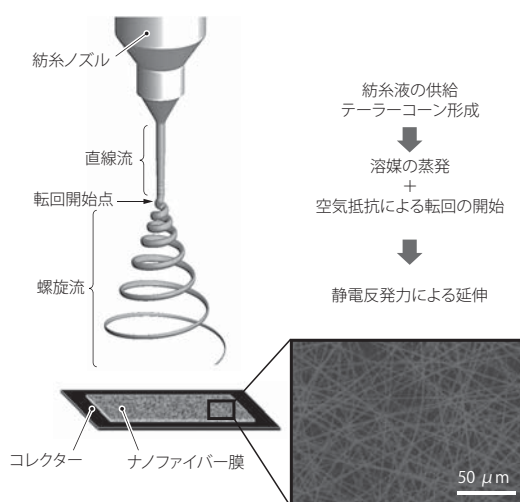


図7. エレクトロスピンニング法の紡糸プロセス

紡糸ノズルに高電圧を印加することで、帯電した高分子溶液をノズルから引き出して紡糸する。

Processes of deposition of nanofibers using electrospinning

糸する技術である。空気抵抗により電気流体である高分子溶液に揺らぎが生じて螺旋(らせん)状となり、直径50～1,000 nmのナノファイバーによる膜が形成される。

エレクトロスピニング法は、常温常圧で成膜できるため、タンパク質などの生体高分子の生理活性を維持したままで成膜できる。また、電圧の印加方法などを調整することで、複雑な3次元形状の表面にも成膜できる。

エレクトロスピニング法による成膜を量産に適用するには、成膜速度が遅く、プロセスコストも高いことが課題であった。そこで、東芝グループは、膜形成過程の直接観察と理論解析に基づいて成膜プロセスを最適化し、ナノファイバー膜の成膜速度を、市販の小型装置の50～100倍に高速化した。

4. ケミカルダイシングによる切断・分離

切断技術としては、機械的に切断するプレス、ダイシング、スクライビングといった技術が広く用いられている。また近年、レーザー切断技術も普及してきており、板金加工などに広く用いられている。

半導体製造のダイシング工程には、機械的なブレードダイシングが広く用いられている。しかし、チップの小型化に伴ってダイシングラインが占める面積比率が高くなり、ウエハー使用効率が低下することが問題となっている。また、チップの小型化に伴ってダイシングライン数も増えるため、加工時間が増大する。

そこで、従来の機械的に切断する方法に変え、化学的に切断するケミカルダイシング技術を開発した(図8)。MacEtchという貴金属触媒を用いたシリコン(Si)の異方性ウエットエッチング技術を応用して、ウエハー全面を10μm以下の細いダイシング幅で一括加工する。

図8に示すように、ウエハー全面を一括加工することで、高いスループットが得られる。また、ダイシング幅が狭くな

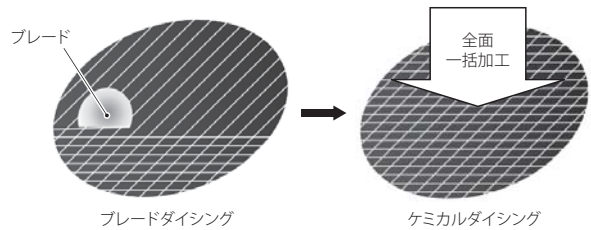


図8. ケミカルダイシングによる一括加工

ブレードによる逐次切断に対して、ケミカルダイシングは一括加工により高速に切断できる。

Batch processing for wafer fabrication using chemical dicing

るため、ウエハー1枚からチップが取れる数(取れ数)が増える。例えば、チップサイズが0.24mm角の場合、従来のブレードダイシングでのウエハー使用効率は約64%である。一方、ケミカルダイシングでダイシング幅を10μm以下にすると、ウエハー使用効率は約92%に向上し、チップの取れ数が1.4倍に増加する。

ケミカルダイシングのプロセスフローを図9に示す。(1)加工を行う領域(ダイシングライン)以外の部分に、保護膜を形成する。次に、(2)触媒となる貴金属イオンを含む置換めっき液にウエハーを浸漬(しんせき)し、露出したSiと貴金属イオンの置換反応によりダイシングライン上だけに金や銀などの触媒を析出させる。(3)ウエハーをフッ化水素(HF)の水溶液と酸化剤を含むエッチング液に浸漬すると、触媒による局所的な反応促進により、触媒直下のSiが選択的にエッチングされる。このとき、触媒はエッチングでできた溝に落ち込んで再度Siのエッチングを促進するため、触媒がウエハーに潜り込む形で垂直にエッチングが進む。最後に、(4)触媒の除去、洗浄を行う。

ウエハーを10μm以下のダイシング幅で安定に加工するには、プロセス条件の適正化が重要である。MacEtchの反

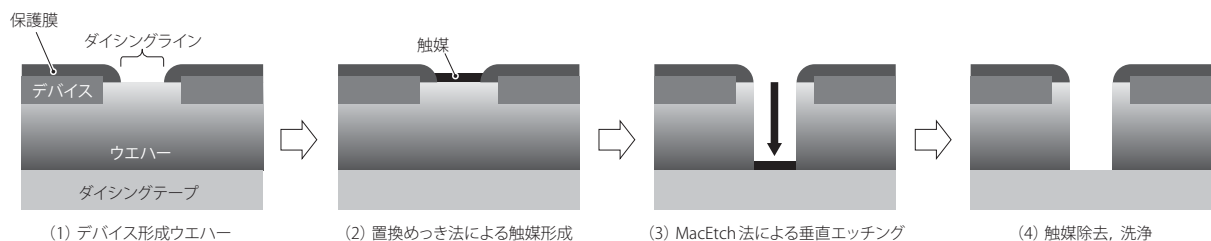


図9. ケミカルダイシングのプロセスフロー

ダイシングライン上だけに貴金属である金や銀などの触媒を析出させ、触媒による局所的な反応促進により触媒直下のSiが選択的にエッチングされる。

Flow of processes of chemical dicing

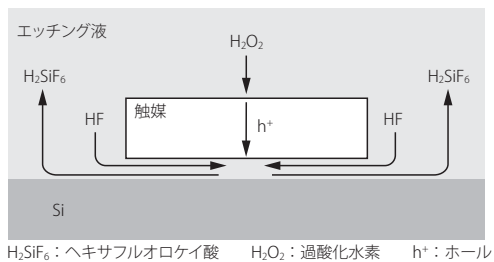


図10. MacEtch反応の物質移動メカニズム

触媒とSiの界面にエッチング液が侵入して反応を起こすモデルであることが分かった。

Mechanism of mass transfer in MacEtch reaction

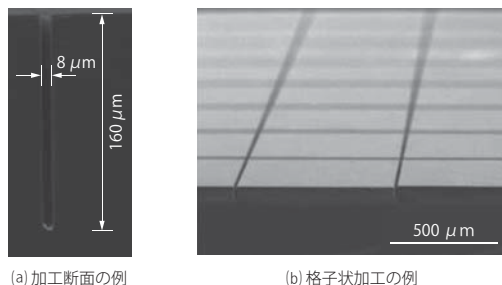


図11. ケミカルダイシングによる加工例

幅8 μmで深さ160 μmのアスペクト比が高く微細な垂直溝が形成され、高精度なダイシング加工を実現した。

Examples of trenches formed using chemical dicing

応機構には解明されていない部分が多いため、エッチングプロセスのメカニズムを明らかにし、それに基づいて条件を最適化した。

MacEtch加工サンプルの元素分析から、MacEtch反応中の物質移動は、触媒とSiの界面にエッチング液が進入して反応を起こすモデルであることが分かった(図10)。この知見から、垂直にエッチングするにはエッチング液中の酸化剤濃度を制御すればよいことが分かり、エッチング液を適正化した結果、図11に示すように、幅8 μmで深さ160 μmの微細なケミカルダイシングが確認できた。

5. あとがき

製品の革新を目指して開発している新規の先端製造技術について述べた。

製品の高機能化、低コスト化を実現するには、新規製造技術の製品への適用においても従来技術と同等以上の製造プロセスの安定性や高速化が求められるため、技術的な困難度は既存技術を適用する場合に比べて高くなる。今回、

プロセスの安定性、高速化の取り組みとして、

- (1) 高機能な造形ができる金属3Dプリンターでは、新しい3D造形技術を用いることによるプロセスの高速化
- (2) 高機能な成膜ができるエレクトロスピンニングでは、プロセスメカニズムの解明による成膜の高速化
- (3) 高速加工ができるケミカルダイシングでは、メカニズム解析に基づくダイシングプロセスの安定性と高度化

などの取り組みについて述べた。

これら以外にも、ここでは詳しく採り上げなかったが、成膜技術である分子線エピタキシー(MBE: Molecular Beam Epitaxy)や原子層堆積(ALD: Atomic Layer Deposition)は、従来の成膜方法よりも高精度に成膜できる手法であり、新規の電子デバイスへの適用が期待されている。また、様々な金属接合に適用できる摩擦攪拌(かくはん)接合(FSW: Friction Stir Welding)は、一般に接合が難しいアルミニウム合金や、チタン合金、異種金属への適用が期待されている。

新規の先端製造技術を製品に適用し、製品の大幅な高機能化や低コスト化を実現するためには、それが製品設計に反映されなければならない。一方、製品設計を行う技術者は、通常、製造方法を念頭に置いて設計を行う。したがって、製造技術者と設計技術者が相互に連携し、設計技術者が新しい製造技術を十分に理解した上で製品設計に取り入れる取り組みが重要になる。

文献

- (1) 塩見 康友. 高速かつ高精細な金属3Dプリンタ. 東芝レビュー. 2016, 71, 6, p.86-87. <http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/06/71_06pdf/r01.pdf>, (accessed 2017-10-26).
- (2) 植松 育生. エレクトロスピンニング法によるナノファイバー膜の高速形成技術. 東芝レビュー. 2017, 72, 4, p.74-75. <http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2017/04/72_04pdf/r01.pdf>, (accessed 2017-10-26).
- (3) 浅野 佑策, ほか. 貴金属触媒エッチングによりシリコンウェーハ全面の一括加工を可能にするケミカルダイシング技術. 東芝レビュー. 2016, 71, 2, p.31-34.



岡田 直忠 OKADA Naotada, Ph.D.
研究開発本部 生産技術センター
博士(工学)
応用物理学会・溶接学会会員
Corporate Manufacturing Engineering Center