

高付加価値ものづくりを目指す機能創成加工

To the New Frontier of Function Creation Processing for High Value Manufacturing



厨川常元*

Prof. Tsunemoto
KURIYAGAWA

We have shown that the future of manufacturing will not be limited to “the creation of form”, but will also include “the creation of function” by creating structures that express functions on or inside the machined surface. This kind of “functional creation processing” is exactly what we are aiming for in “high value manufacturing”, and we believe that it will become increasingly important. In this report, we introduce the UV-assisted tape grinding technology for gallium nitride substrates, plasma shot technology for creating low-friction and low-wear surfaces, and new surface function creation technology (ex. lattice coating) and functional material creation technology based on 3D modeling technology.

Key Words: high value manufacturing, function creation processing, UV-assisted tape grinding, gallium nitride, plasma shot

1. はじめに

“ものづくり”は我が国の基盤であり、その将来ビジョンを明確にすることは重要である。そのために大学をはじめ、公設試や企業、行政も含めたオールジャパンでの取り組みが活性化している。例えば、近年ではカーボンニュートラル社会や超高齢社会対応といった大きな目標を設定し、その実現を宣言したのはその一例である。それでは、ものづくりの分野での対応はどうしたらよいのだろうか？前報¹⁾では、これからの“ものづくり”を考える上で重要であると思われるキーワードについて紹介した。すなわち、これまでの単なる“形状創成”だけにとどまらず、その表面あるいは内部に機能を発現する構造を作り込む“機能創成”が重要な役割を担うようになるであろうことを説明した。このような“機能創成加工”の提案は、まさに“高付加価値ものづくり”を目指すもので、ますますその重要度が増していくものと考えられる。これ以降、筆者の研究室では、ポストナノ精度加工としてのピコ精度加工や、表面機能創成技術、さらには噴射加工の歯科治療への応用と臨床試験に取り組んできた。本報ではこれらの中から、窒化ガリウム基板の紫外線援用テープ研削技術、低摩擦・低摩耗表面創成のた

めのプラズマショット技術、3D造形技術を応用した新しい表面機能創成技術や機能性材料創成技術について紹介する。

2. 窒化ガリウム基板の紫外線援用テープ研削技術

シリコン (Si) の限界を超えるパワーエレクトロニクスデバイス用新材料として炭化珪素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) 等の半導体材料が注目されている。特に GaN デバイスは、白色 LED での実用化が始まり、一般照明用やヘッドライトなどの車載用光源として普及が進んでいる。さらには今後ますます需要が伸びると予想される電気自動車やエアコンなどで使用されるパワーデバイスへの適用も検討が始まっている。しかしながら GaN デバイスの普及を加速させるためには、高品質かつ大口径の GaN 基板を低価格で製造する技術の確立が必須である。しかし GaN 材料は Si 材料と比較して高硬度で化学的に安定であるため、加工時間が 100 ~ 150 時間と Si 材料と比較し一桁近く長くなっている。

従来から Si 基板の研磨工程には化学機械研磨法 (Chemical Mechanical Polishing, 以下 CMP) が用いられてきた。これは化学的な除去作用で大きな加工量を確保し、機械的作用で平坦性を担保する複合加工法である。例えば、Si 基板では強アルカリ環境下でコロイダ

*東北大学 大学院工学研究科 教授

ルシリカ粒子を用いて研磨が行われている。しかし GaN 単結晶は化学的に安定であるため、Si と比較して極端に加工能率が低下する。そこで久保ら²⁾とともに、GaN 基板に作用させる砥粒の種類により、どのような反応が生じ、GaN 基板表面からどのように Ga 原子が分離していくのかを、Tight-binding 量子分子動力学シミュレーションを用いて解明した。その結果、中性環境下でナノダイヤモンド (ND) 砥粒を用いた場合、OH ラジカルを援用することにより砥粒・基板間結合が起点となって表面 Ga 原子が脱離することが分かった。さらに塩基性環境下では、OH⁻ の作用によって砥粒・基板間結合が形成されやすくなり、研磨が促進されることが示唆された。この知見に基づき、過酸化水素水 (HP) に紫外線 (UV) を照射して OH ラジカルを発生させながら ND 砥粒で加工する手法を考案した。

通常の研磨方法では工作物 (基板) と研磨定盤とが面接触となるため、研磨中に紫外線を効率的に照射できない。一般的に OH ラジカルの寿命は非常に短いため、加工領域近傍で紫外線照射が可能、さらに効果的に ND 砥粒を連続的に加工領域に供給する方法として図 1 に示すような紫外線援用テープ研削装置を試作した³⁻⁵⁾。この装置では、ウレタン製のコンタクトホールを介して研磨テープを GaN 基板に押しつける構造とした。この場合、接触状態 (コンタクトホールの直径、弾性率、加圧力、加工速度等) を変えることにより GaN 基板との接触面積を精密に制御でき、有効切れ刃数を制御することが可能となる。基板は油静圧の超精密高速反転テーブル (最大 1 000 ストローク/分) に固定されて往復運動する。さらに研磨テープであるため固定砥粒方式となり、テープをフィードすれば、加工領域には次々と新しい砥粒が供給されるという利点も生じる。最終的には、これまで一般的であった遊離砥粒方式の基板加工プロセスをすべて固定砥粒方式にすることも可能であり、大幅な工程の簡略化が期待される。

研磨実験の結果、UV + HP の援用効果とテープ研削機構を複合することにより、初期表面の 5.3nmRa が 10 分加工後に表面粗さが 1nm 以下になった。UV と HP を用いない場合では表面粗さが 1nm 以下になるまで平均 60 分の時間を要したことから、UV + HP 援用により、援用効果を使用しない場合と比較して 6 倍以上の加工速度向上の効果があることが分かった (図 2)。



図 1 紫外線援用テープ研削装置
UV-assisted tape grinding equipment

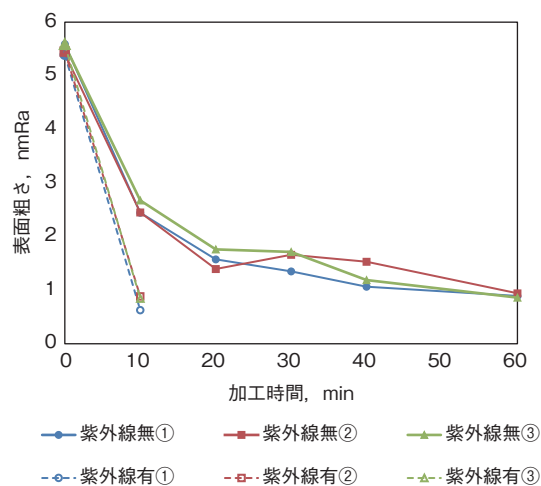


図 2 紫外線援用の効果 (UV 照射強度: 1.0W, UV 波長: 365nm, HP 濃度: 98%)
(加工条件: ダイヤモンド砥粒 #10000, 揺動幅 ±1.5mm, 揺動回数 500 回/min)
UV-assisted effects (UV irradiation intensity: 1.0W, UV wavelength: 365nm, HP concentration: 98%)
(Processing conditions: diamond abrasive #10000, oscillation width ±1.5mm, oscillation frequency 500 times/min)

3. プラズマショット法による低摩擦・低摩耗表面創成

プラズマショット (PS) 法は放電加工を応用した表面処理手法である⁶⁻⁹⁾。図 3 に示すように、PS 法は、電極・工作物間に連続的なパルス放電を発生させることにより電極を溶融させ、工作物上に移行させることで改

質層を形成する。本手法では、微細なパルス状の放電が局所的に繰り返されるため、被処理材表面には微細な凹凸（マイクロディンプル：油潤滑下では油だまりとして作用）が形成される。またそれと同時に、電極材料が溶融した状態で工作物側に移行し、一部基材と混合溶融することで密着性の高い改質層が形成される。これらの特徴を活かすことで、低摩擦かつ低摩耗を有する魅力的な表面の創成が期待できる。

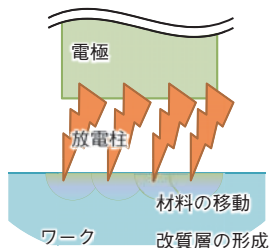


図3 プラズマショット法の概略図

Schematic diagram of the plasma shot method

図4は電極として TiC や Si を用いてステンレス基板上にプラズマショット処理をしたときの、改質面のビッカース硬度を測定したものである。プラズマショット処理を行うことにより、硬度は約5倍以上になることが分かった。なお本手法は、鋳鉄やアルミニウム等の鋳造製品のように、硬化処理が困難なものにも対応可能で、かつ表面にはマイクロディンプルが生成されるので、潤滑性能も向上することが期待される。さらにプラズマショット面のマイクロディンプルの凹凸を研削加工等により除去加工すれば、硬化処理した部分の境界が分からなくなるため、工程のブラックボックス化が図れる。

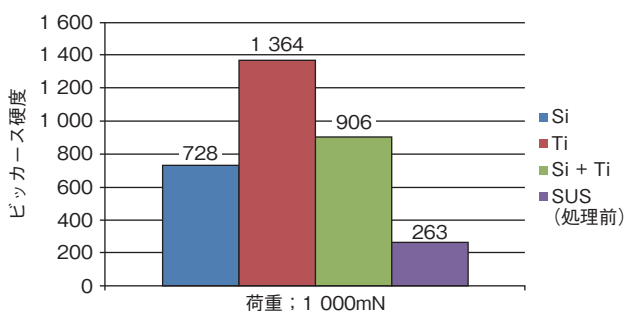


図4 プラズマショット法による表面硬度の増加

Increase of hardness by plasma shot treated surface

4. 3D 積層造形技術による機能性 インターフェース創成

3D 積層造形は、目的とする構造物の3次元形状情報があれば複雑形状の造形も可能になる基盤技術として普及してきた。特に近年では、金属やセラミックスの3D 積層造形技術は、医療分野ではテーラーメイドのインプラント（人工骨、骨固定材など）作製技術として期待されている。しかし造形条件によって造形物の表面性状や結晶構造、あるいは組織が変化し、その変化に伴って製品自体の機械的な性質も変化することが知られている。本報では特にレーザービーム 3D 金属積層造形技術を応用し、単なる形状創成だけではなく、機能創成、特に表面機能創成法として開発した技術について紹介する。

4.1 微細ラティスコーティング技術

製品の表面に周期的なテクスチャを形成することで、例えば濡れ性、潤滑性、生体親和性、アンカー効果などの機能を発現させることが可能になれば、製品自体の付加価値が向上する。そこで、切削や研削といった通常の機械加工で製品の寸法形状の大枠を作り上げた後に、その表面に 3D 金属積層造形技術でテクスチャを創成する方法を提案する。

著者らは、任意の自由曲面上に微細なラティス構造をプリンティングするという新手法“微細ラティスコーティング法”を開発した。金属積層造形では「粉末床溶融結合法 (Powder Bed Fusion, 以下 PBF 法)」と「指向エネルギー堆積法 (Direct Energy Deposition, 以下 DED 法)」という二つのプロセスが主流である。通常、複雑な構造体を造形する場合には PBF 法が用いられるが、平坦なベースプレート上に構造を造形することになる。一方、自由曲面に対して造形をする場合には DED 法を用いることになるが、この場合には複雑形状の造形は困難となる。これらに対し微細ラティスコーティング法は自由曲面上に複雑な構造体を造形することが可能で、得られる構造の最小造形幅はおおよそ粒子一つ分という点で、類をみない革新的なプロセスである¹⁰⁻¹²⁾。

図5に微細ラティスコーティング法により金属円筒表面にテクスチャリングした例を示す。

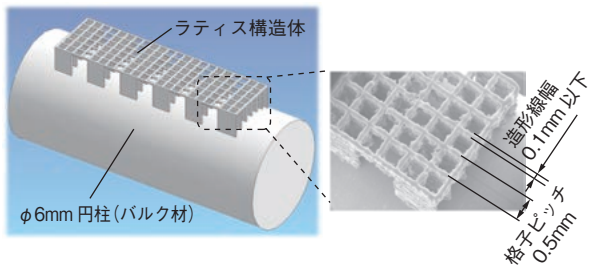


図5 微細ラティスコーティング法による造形例
Sample of micro-lattice coating

4.2 機能性材料創成技術

金属積層造形において最小単位の基礎的現象をとらえるべく、粉末粒子単体の微視的な溶融挙動を明らかにし、造形プロセスで生じるミクロな現象を解明することで、造形プロセスの原理を明らかにした。その結果、レーザービームの走査速度やエネルギー密度を制御することにより造形物内部の結晶構造や組織を任意に制御可能であることを示した。図6はレーザー条件を変えて造形した構造体の結晶構造の違いを示した電子線後方散乱回折 (EBSD) により結晶方位を色別表示した IPF (Inverse pole figure) Map である。その結果、レーザー条件を制御することにより、結晶構造を微細化させたり、逆に任意の方向に粗大化させることも可能で、造形物の機械的特性やその異方性にも影響を与える可能性が期待できる。

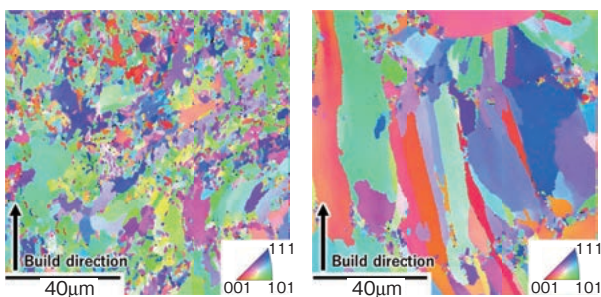


図6 レーザー条件による結晶構造の相違
Difference of crystal structure by laser condition

さて 3D 金属積層創成においては、その造形物内に空孔が残留することはその機械的強度を低下させる一因となるため、極力避けるべきとされている。しかし造形過程で偶発的に生じるこれらの空孔を積極的に利用することで、造形物内部に多孔質構造を付与することを考えた。もしそれが可能となれば、新たな機能性構造体の創成法として有効である。我々は、さらに無作為に発生するこれらの空孔を、造形条件の制御により、その分布や形態

も含めて計画的に造形物内部に配置することを可能とする方法を開発した^{13, 14)}。

この方法で作成した連結空孔を有する機能性構造体 (根状多孔質構造 Rhizoid Porous Structure, 以下 RPS と略記) の断面画像と CT 画像を図7に示す。図に示すように、連結空孔はその形状や方向、分布状態を制御できることが明らかになった。また図8は、その空孔分布状態を半径方向に傾斜させて造形した一例である。この技術は歯科治療の分野にも応用可能である。図9は我々が目指す高機能性インプラントの内部構造コンセプトである。このような RPS を利用したインプラントは、顎骨との接着性の向上や、自然歯に近い弾性体を実現できるなど、多くの利点をもたらすものと期待されている。

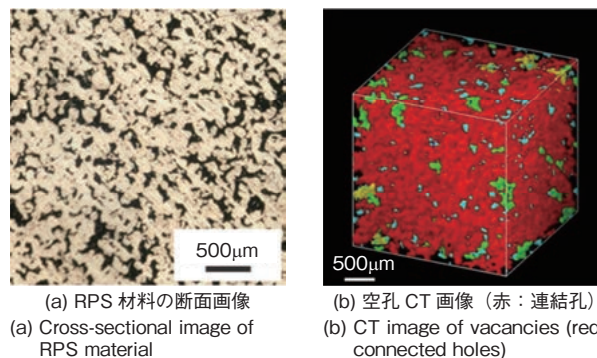


図7 作成した RPS
Sample of Rhizoid Porous Structure (RPS)

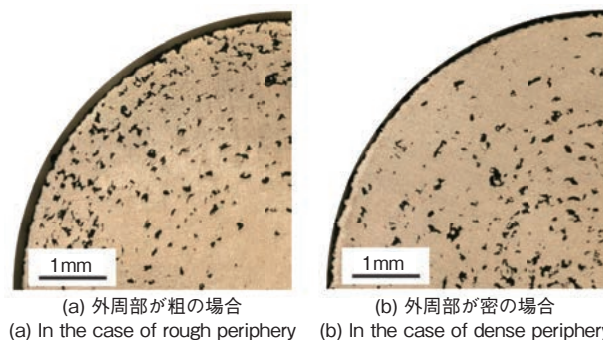


図8 RPS の空孔傾斜分布
Porosity gradient distribution of RPS

5. まとめ

本報では、今後の“ものづくり”を考える上で重要となる“高付加価値ものづくり”を目指す加工方法として、窒化ガリウム基板の紫外線援用テープ研削技術、低摩擦・低摩耗表面創成のためのプラズマショット技術、3D 造形技術を応用した新しい表面機能創成技術 (微細

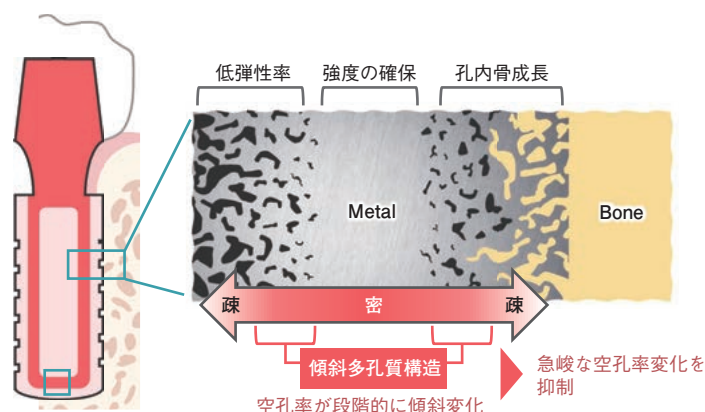


図9 歯科用高性能インプラントの内部構造コンセプト
Proposed new internal structure of high performance dental implant

ラティスコーティング法) や機能性材料創成技術について紹介した。

これからの“ものづくり”のための加工技術基盤実現のためには、「ナノの世界の現象の本質を把握した科学的な合理性を持ったものづくり」を実現することが必要不可欠である。また革新技术の創出、すなわちハードウェアの高度化のみに偏重してはならない。ハードウェアの開発はもちろん重要であるが、それらを如何に組み合わせ、使いこなしていくのかといったソフトウェアの開発も必要不可欠である。

最後に、ものづくりの根幹は、生産から廃棄、さらにはリサイクル（リユースも含む）までを考慮した“循環型ものづくり”でなくてはならない。このような“もの”の一生の流れの中で発生するCO₂など温室効果ガスをゼロにする、ライフサイクルアセスメントを設計、満足することが最も重要であることは言うまでも無い。

参考文献

- 1) 厨川常元：これからの“ものづくり”とは（形状創成から機能創成へ），JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1010(2012)2-8.
- 2) 五十嵐拓也，河口健太郎，大谷優介，樋口祐次，尾澤伸樹，久保百司：計算科学手法を用いた GaN CMP における砥粒-基板間の化学反応機構の検討，2017 年精密工学会秋季大会学術講演論文集，(2017)F20.
- 3) Keita Shimada, Ayaka Watanabe, Yoshifumi Takasu, Masayoshi Mizutani, Tsunemoto Kuriyagawa : Stochastic simulation of tape grinding for wafer-like workpiece, Materials Science Forum, 874, (2016)91-96.
- 4) 鷹巣良史，嶋田慶太，水谷正義，厨川常元：GaN のスクラッチ加工におけるクラック発生機構の研究，砥粒加工学会誌，61(7)，(2017)，392 - 397.
- 5) 鷹巣良史，嶋田慶太，水谷正義，厨川常元：単結晶窒化ガリウム (GaN) 基板の高速高精度加工法の開発-紫外線援用テープ研削法の提案，砥粒加工学会誌，63(11)，(2019)，569 - 574.
- 6) Nobuyuki Sumi, Chihiro Kato, Keita Shimada, Masayoshi Mizutani, Tsunemoto Kuriyagawa : Influence of workpiece materials on the characteristics of the layers by electrical discharge coating, International Journal of Automation Technology, 10(5), (2016), 773 - 779.
- 7) Nobuyuki Sumi, Chihiro Kato, Keita Shimada, Takashi Yuzawa, Hiroyuki Teramoto : Masayoshi Mizutani, Tsunemoto Kuriyagawa, Mechanism of defect generation in the TiC layer and Si layer by electrical discharge coating, 18TH CIRP CONFERENCE ON ELECTRO PHYSICAL AND CHEMICAL MACHINING (ISEM XVIII), 42, (2016), 221 - 225.
- 8) 鷺見信行，一宮正和，京泉朋希，江川諒仁，嶋田慶太，水谷正義，厨川常元，山縣延樹：SPH 粒子法によるプラズマショット現象の解明，日本計算工学会論文集，20180006，(2018)。
- 9) 京泉朋希，江川諒仁，柴田頼人，加藤千拓，鷺見信行，嶋田慶太，水谷正義，厨川常元：プラズマショット法と研削加工による低摩擦・低摩耗の創成，砥粒加工学会誌，62(7)，(2018)，371 - 376.
- 10) 前花英一，石橋信治，嶋田慶太，水谷正義，厨川常元：パルスレーザーによる純チタン粒子の熔融接合プロセス，砥粒加工学会誌，61(1)，(2017)，40 - 46.
- 11) 前花英一，長森亜弓，石橋信治，溝井琢巳，嶋田慶太，水谷正義，厨川常元：レーザー金属積層造形法による微細

構造の創成－純 Ti 単粒子層に対する狭小ビード造形,
砥粒加工学会誌, 62(10), (2018), 527 – 534.

- 12) 前花英一, 臼沢太一, 石橋信治, 嶋田慶太, 水谷正義,
厨川常元: 微細ラティスコーティング技術の開発－重力
落下式粉末供給手法による壁構造の評価, 砥粒加工学会
誌, 64(1), (2020), 39 – 46.
- 13) Shinji Ishibashi, Masataka Chuzenji, Takumi Mizoi,
Masaki Tsukuda, Hidekazu Maehana, Keita
Shimada, Masayoshi Mizutani, Tsunemoto
Kuriyagawa : Design of pore morphology in porous
metal manufactured via selective laser melting, The
Proceedings of the 8th Conference of Asian Society
for Precision Engineering and Nanotechnology,
(2019) A29.
- 14) Shinji Ishibashi, Keita Shimada, Hiroyasu Kanetaka,
Masaki Tsukuda, Takumi Mizoi, Masataka Chuzenji,
Shoichi Kikuchi, Masayoshi Mizutani, Tsunemoto
Kuriyagawa : Porosity and Tensile Properties of
Rhizoid Porous Structure Fabricated Using
Selective Laser Melting, International Journal of
Automation Technology, 14 (4), (2020), 582-591.