

機能創成加工が拓く新しいものづくり

東北大学 大学院医工学研究科
教授 厨川 常元



1. はじめに

戦後、日本の製造業は世界に類を見ない驚異的なスピードで発展し、わが国の繁栄をもたらした。特に1970年代、80年代の大量生産・大量消費対応型の“ものづくり”は、日本を世界有数のものづくり大国に押し上げた。しかし1990年代に起こったバブル崩壊、その後の景気低迷状態は、これまでの“もの”の価値観や“ものづくり”自体に対する考え方を見直すきっかけを与えた。すなわち大量生産・大量消費対応製品から、超精密加工技術を基軸とする高付加価値製品への変革である。この結果、光学素子、半導体デバイスなどの開発・製造技術がより進化し、わが国の産業基盤を支えるまでになっていった。しかし2000年代になると、これらの超精密加工製品といえども周辺国の猛烈な技術キャッチアップにより、競争力を急速に失っていった。この傾向は、2000年代後半のリーマンショック発生により決定的となった。そして2011年3月11日に発生した東日本大地震、さらには日本に慢性的に進行していた少子高齢化傾向と相まって、ものづくりビジョンの変革が起こってきた。すなわち従来の“ものづくり”から、サービスや価値創成を念頭にした“ことづくり”への概念の深化とともに、安心・安全、環境・エネルギー、高齢化社会対応をキーワードとした対象の変化である。ここでは、筆者らが超精密ものづくりの次に来るべき技術の1つとして提案している機能創成加工について紹介する。

2. 究極の形状創成から機能創成へ

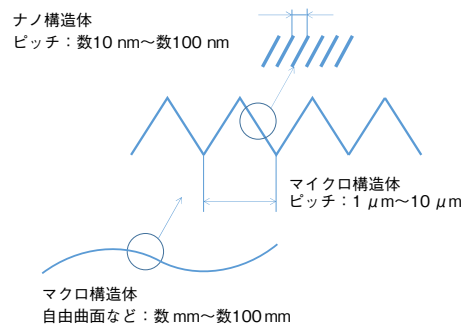
通常、加工部品の加工精度評価基準は形状精度と表面粗さの2つである。近年、この加工精度の要求はますます厳しくなり、今やナノ精度ではなく、ピコ精度に達するものも出てきた。しかし現状ではまだまだ不十分ではあるが、このような究極の加工精度を得るために、加工原理、工具、工作機械、評価測定法、材料、組み立て法、設計論など、総合的な研究開発が始まっている。

例えば、非球面レンズの加工を例に挙げると、研削加工において、仕上面粗さをよくする“パラレル研削法”[1]、次に形状精度を向上させる“円弧包絡研削法”[2]、均一な加工面を得るための“超安定非球面研削法”[3]が開発され、25 nmの形状精度と数 nmオーダーの表面粗さを得ることに成功している。この研削工程の後に研磨加工を行うことにより、表面粗さをさらに1桁以上小さくすることが可能である。

機能創成加工は、このようにして得られた超精密加工表面上に微細構造体を創成したり、あるいは加工表面近傍の結晶構造を制御したりすることにより、新たな機能を発現させるための加工法である。このように“形状創成+機能創成”により高付加価値創成を目指した“ものづくり”が機能創成加工である。すなわち単なる形状創成から、機能創成を加味した新しいものづくり技術への融合、発展である。

3. 複合構造体と複合加工法

機能創成を実現するためには、製品の構造自体が複合構造となっているものが多い。第1図は製品表面にナノ・マイクロオーダーの微細構造が形成されているナノ・マイクロ・マクロ複合構造体の模式図である。この図に示すように、自由曲面レンズの上に μm オーダーの回折格子が形成され、さらにその上に数100 nmピッチの微



第1図 ナノ・マイクロ・マクロ複合構造体

小突起が形成され、モスアイ構造が形成されていれば、無反射機能を有する屈折・回折複合光学素子となる。

このような微小複合構造体を得るためには、第1表に示したような種々のマイクロ加工法（M⁴プロセス；micro/meso mechanical manufacturing）を単独で使用するよりも、複合させて使用することにより、大幅な効率アップや特殊機能を発現できることが多い。例えば、超音波加工と研削（切削）加工を複合させた超音波援用研削（切削）[4]、レーザ加工と切削加工を複合させたレーザ援用マイクロ切削[5]、超音波加工と研削加工と電解作用の3つを複合させた超音波振動援用電解研削[6]などである。

第1表 M⁴プロセスの種類

砥（と）粒加工	マイクロ研削 マイクロ研磨 マイクロ超音波加工 マイクロアブレイシブジェット加工 など
切削加工	マイクロ切削 マイクロミリング など
その他	マイクロ放電加工 マイクロ付着加工 マイクロパンチング マイクロレーザ加工 マイクロ成形加工 など

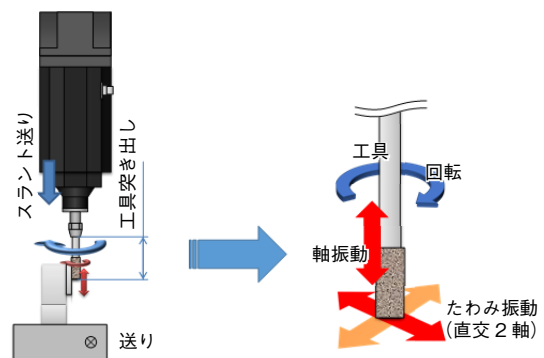
さらにマイクロ加工においては、切りくず自体もナノオーダーとなるため、材料の除去メカニズムに関しても化学的な要素が強く影響してくる。特に電解作用や放電現象、レーザなどのプロセスを複合させた場合には、ナノ領域における物理化学事象を単に機械工学的な視点で捉えるだけではなく、化学的かつ量子力学的アプローチで捉えることも必要となるであろう。

4. 3D超音波振動援用加工による機能創成

元来、超音波振動援用加工法は、セラミックスやガラ

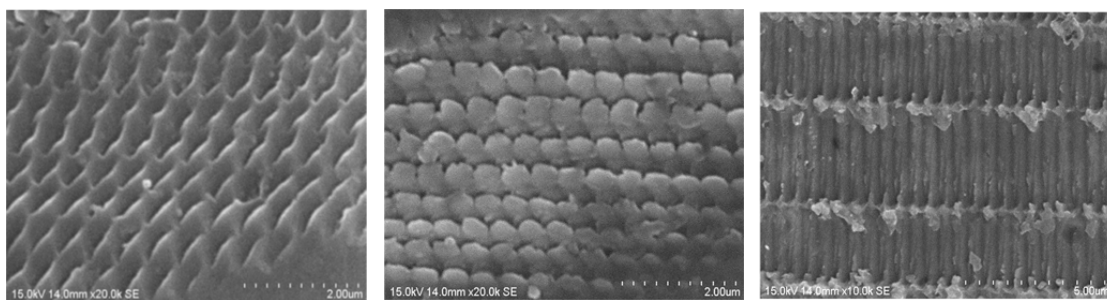
スなどの硬脆（こうぜい）材料を高効率で加工する手法として開発、発展してきた。例えば、遊離砥（と）粒を水や油剤に懸濁させたスラリーを超音波振動する工具近傍に供給して除去加工を行う超音波加工、切削工具や砥石などの工具を超音波振動させながら工作物に切り込み、除去加工をする超音波振動切削・研削などである。ここで紹介する3D超音波振動援用マイクロ加工[7][8]は、回転するマイクロ工具に3軸方向の超音波振動を与えて工具刃先の運動軌跡を制御することにより複雑な微細構造を創成するものである。そして形状創成と同時にその加工表面に微細構造を創成できることが特長である。

第2図は、開発した3D超音波スピンドルとマイクロ工具先端の振動方向を示したものである。スピンドル軸方向の振動だけではなく、軸に直交する2軸回りのたわみ振動を加えた合計3軸方向の超音波振動を工具に付与しながら加工することができる。3軸方向の振動数、砥石回転数、砥石送り速度やピッチなどを制御することにより、仕上面に周期的な微細構造（テクスチャ）を創成することが可能となる。

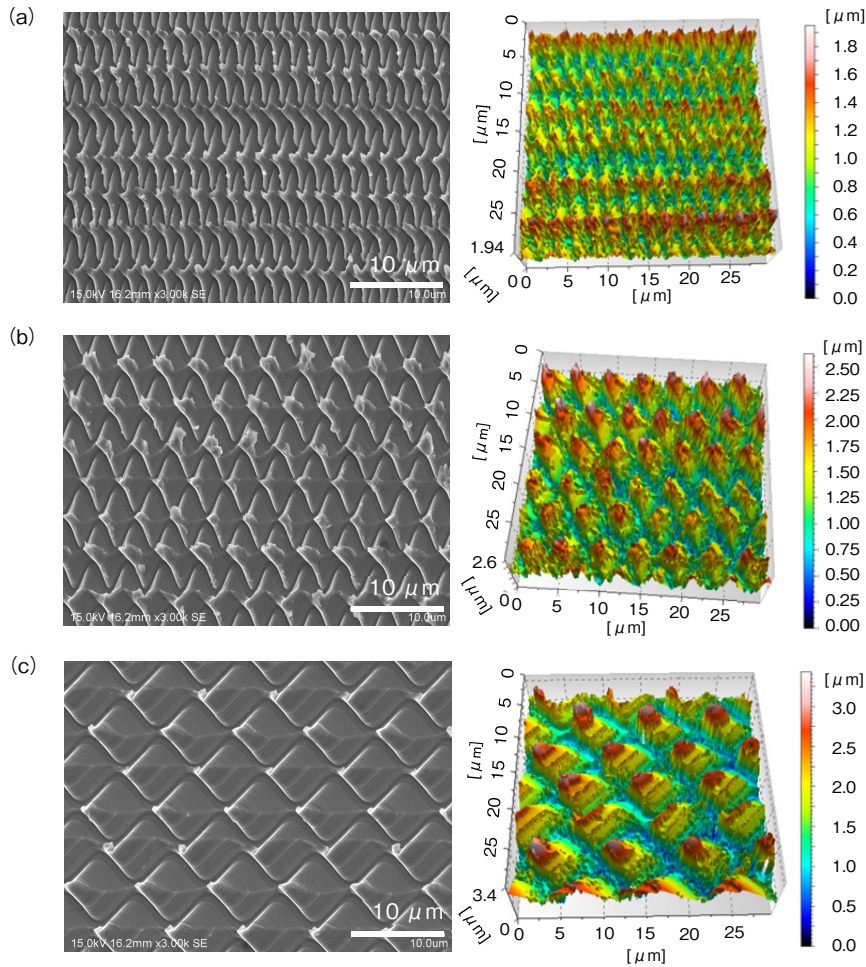


第2図 3D超音波振動援用マイクロ加工

例えば直径1 mmのSD600の小径ダイヤモンド砥石を振動させ、ジルコニアセラミックス表面を加工した場合、第3図に示すようなテクスチャを創成することができる。



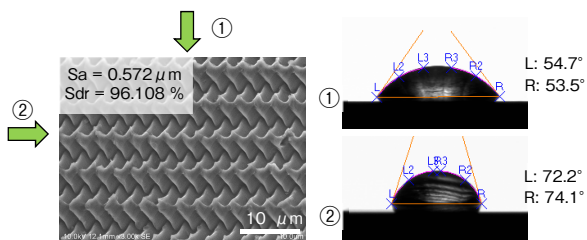
第3図 3D超音波振動援用研削で作成した500 nmピッチの周期構造体



第4図 単結晶ダイヤモンドマイクロ工具によりNiP表面に創成したテクスチャリング

図の3例は、送り速度、振動周波数などを変化させ、周期が500 nmになるように調整したものである。

また第4図は単結晶ダイヤモンドマイクロ工具を振動させ、アモルファスNiP表面にテクスチャリングを行ったものである。工具の回転速度と送り速度を変化させることにより、種々のテクスチャが創成できる。このような表面は第5図に示すように、濡（ぬ）れ性に対して異方性を発現することが明らかになっている。



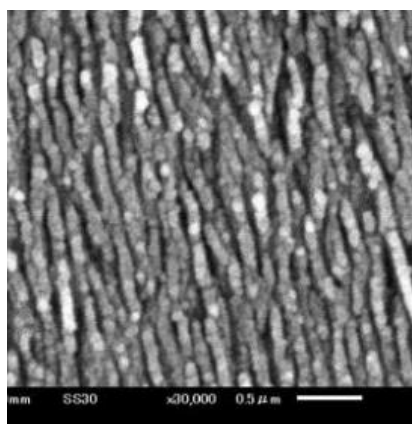
第5図 テクスチャリング表面の濡れ特性の異方性

5. レーザ援用加工による機能創成

従来、レーザー加工は溶接や切断など、熱加工法の1つとして使用されていた。しかし、近年、レーザー照射の特殊な作用に着目した加工が注目されている。例えば、半導体素子表面に発生したクラックやアモルファス層などの欠陥を修復[9]したり、材料表面に周期性ナノ構造を創成してさまざまな機能を付与したりする試み[10][11]などである。特に近年では、パルス幅がピコ秒～フェムト秒の極短パルスレーザーが普及してきており、製品製造への適用が加速されている。

これまで、ピコ秒～フェムト秒のパルス幅を有するレーザーを金属材料に照射することにより、表面に表面プラズモンを発生させ、レーザー波長程度の周期を有する微細構造体が形成されることが知られていた。しかしガラス表面に周期微細構造体を形成することは困難であった。筆者らは、ガラス基板の上にガラス前駆物質を塗布し、そこに常温常圧環境下で低エネルギーのフェムト秒レーザー

を照射することによって、ガラス表面にも周期性微細構造を作成する新しい手法を考案した[12][13]。第6図に、本プロセスで形成したガラス基板表面のSEM写真を示す。周期が200 nm程度の微細構造が形成されていることがわかる。この平滑なガラス基板の反射率は、無処理の場合、可視光波長300 nm - 800 nm全域において4.0%以上であるが、表面に微細構造を創成した場合は、300 nm-800 nm全域において0.4%~0.9%、550 nmにおいて0.44%まで低減されていることが明らかになった。これは本プロセスで作成した周期微細構造がモスアイ効果を発現し、ガラス表面の反射が低減したためである。



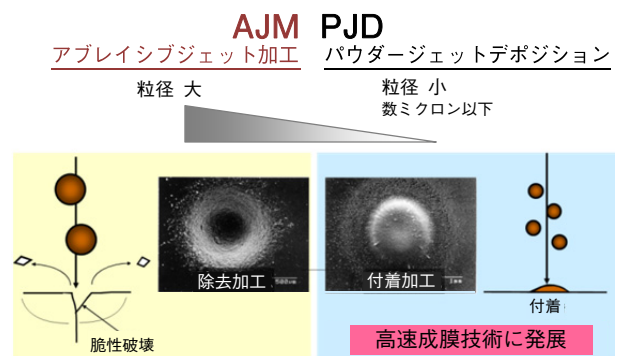
第6図 ガラス基板表面に創成した周期微細構造

次にレーザー照射による生体応用例に関して紹介する。人工関節に使用するインプラントや、欠損歯治療の一つであるデンタルインプラントなどでは、インプラントの骨埋入部と骨とが堅密に接着されることが望ましい。そのために、チタン製インプラントの表面にナノ秒パルスレーザーを照射し、体液中においてハイドロキシアパタイトを自然に析出させる性質（生体活性）と、骨芽細胞に対して無害、かつ骨生成活性を向上させる性質を付与することに成功した[14][15]。

6. パウダージェットデポジションによる機能創成

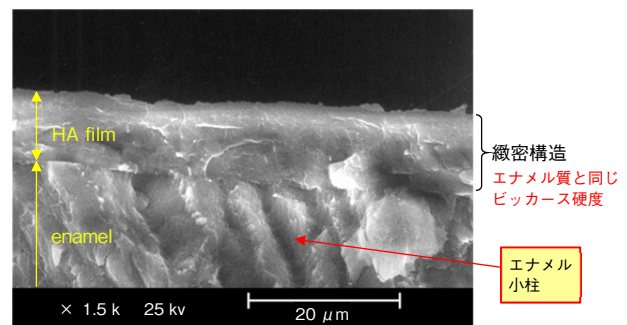
最後に、噴射加工により厚膜を成膜し、機能創成する技術を紹介する。本プロセスは、高速ガス噴流により加速されたサブ μm ~数 $10\ \mu\text{m}$ の微粒子を小径ノズル（内径0.1 mm~1 mm）から噴出させ、硬脆材料に高速かつ高密度で衝突させることにより行う。ガラスなどの硬脆材料にアルミナ粒子を衝突させた場合、通常は第7図左図に示したように材料は脆性破壊を起こし材料除去となる。しかし粒子直径が約 $1\ \mu\text{m}$ ~数 μm の場合、脆性破壊は起

こらず、逆に粒子材料自身が固着成膜してしまう（第7図右図）。約 $250\ \text{m/s}$ ~ $350\ \text{m/s}$ の速度で衝突した粒子は約数 nm ~数 $10\ \text{nm}$ の微小片に破碎されるが、非常に活性であるため直ちに再結合し膜となる。この反応は数 ns の微小時間内に完了する。本プロセスは常温大気圧環境下で可能であることが大きな特長で、パウダージェットデポジション（Powder Jet Deposition; 以下、PJD）[16][17]と呼ぶ。



第7図 噴射加工における除去から付着への遷移

このPJDにより、ヒト歯表面のエナメル質（約96%がハイドロキシアパタイト。以下、HA）にHA粒子を高速で衝突させ、HA膜を成膜することができる。第8図は、エナメル質上に成膜したHA膜の断面写真である。量子分子動力学シミュレーションにより、HA膜は原子間結合により強固に固着していることが確認されている。現在、抗菌性HA粒子も開発されており、これを歯質表面に成膜することにより、中長期的に予防的処置をすることも可能となる。また TiO_2 との複合HA粒子も開発されており、こちらは審美歯科への応用が始まっている。これらはPJDによる機能性バイオインターフェース創成であり、現在臨床試験が行われている。またいずれも、全く新し



第8図 パウダージェットデポジションによりヒト歯エナメル質上に成膜されたハイドロキシアパタイト厚膜

い予防歯科、審美歯科の分野を創出するものであり、大きなビジネスチャンスが期待されている。

7. おわりに

高機能高付加価値製品開発のために、超精密に加工された表面上に微細構造体を創成したり、加工表面近傍の結晶構造を制御したりすることにより、新たな機能を加工表面に発現させるための工夫を加味した“ものづくり”すなわち“形状創成+機能創成”を目指した機能創成加工技術について紹介した。

新規加工プロセスの創出、分子原子レベルでの加工現象の科学的解明、機能を実現するための基本原理の解明、設計論の確立が必要不可欠である。今後、実用化を重視した産学官連携を強力に推進することにより開発研究が加速することを、非常に楽しみにしている。

参考文献

- [1] 佐伯優 他, “パラレル研削法による非球面金型加工に関する研究,” 精密工学会誌, vol. 68, no. 8, pp. 1067-1071, 2002.
- [2] 厨川常元 他, “円弧包絡研削法による非軸対称非球面セラミックスミラーの加工,” 日本機械学会論文集 (C編), vol. 63, no. 611, pp. 2532-2537, 1997.
- [3] 吉原信人 他, “軸対称非球面研削における研削模様について,” 精密工学会誌, vol. 70, no. 7, pp. 972-976, 2004.
- [4] 嶋田慶太 他, “電着ダイヤモンド砥石による超音波援用マイクロ研削に関する研究 第2報: 砥石端面による工作物除去に及ぼす超音波振動の影響,” 砥粒加工学会誌, vol. 54, no. 1, pp. 37-40, 2009.
- [5] 益子直人 他, “微細構造金型加工に対するレーザー援用マイクロ切削法に関する研究,” 砥粒加工学会誌, vol. 59, no. 10, pp. 588-593, 2015.
- [6] Satoshi Kobayashi et al., “Development of an Ultrasonically-Assisted Electrolytic Grinding System,” International Journal of Automation Technology, vol. 7, no. 6, pp. 654-662, 2013.
- [7] Shaolin Xu et al., “Fabrication of hybrid micro/nano-textured surfaces using rotary ultrasonic machining with one-point diamond tool,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 86, pp. 12-17, 2014.
- [8] Shaolin Xu et al., “Analysis of machinable structures and their wettability of rotary ultrasonic texturing method,” Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016 (In press).
- [9] Jiwang Yan et al., “Development of a high-frequency pulse laser irradiation system for repairing silicon wafers damaged by abrasive machining processes,” Int. J. Abrasive Technology, vol. 3, no. 3, pp. 175-189, 2010.
- [10] J. Reif et al., “Ripples revisited non-classical morphology at the bottom of femtosecond laser ablation craters in transparent dielectrics,” Appl. Surf. Sci., vol. 197-198, pp. 891-895, 2002.

- [11] K.Okamuro et al., “Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation,” Phys. Rev. B, 82, 165417, 2010.
- [12] 柴田章広 他, “フェムト秒レーザーによるガラス材料表面へのナノ構造加工,” 精密工学会誌, vol. 81, no. 9, pp. 862-866, 2015.
- [13] 柴田章広 他, “ガラス表面への微細構造創成法のメカニズム解明-超短パルスレーザーを用いたナノテクスチャリングに関する研究,” 精密工学会誌, vol. 82, no. 5, pp. 443-447, 2016.
- [14] 水谷正義 他, “純チタンへのナノ秒パルスレーザー照射による生体活性表面の創成,” 砥粒加工学会誌, vol.59, no. 1, pp. 17-22, 2015.
- [15] Yugo Fukayo et al., “Bone and Gingival Connective Tissue Responses towards Nanosecond-Pulsed Laser-Treated Titanium Implants,” Journal of Hard Tissue Biology, vol. 25, no. 2, pp. 181-194, 2016.
- [16] Ryo Akatsuka et al., “Characteristics of hydroxyapatite film formed on human enamel with the powder jet deposition technique,” Journal of Biomedical Materials Research Part B, 98B (2), pp. 210-216, 2011.
- [17] 佐藤慧, “パウダージェットデポジション法によるエナメル質へのハイドロキシアパタイト成膜,” 日本機械学会論文集 (C編), vol. 79, no. 808, pp. 109-117, 2013.

《プロフィール》

厨川 常元 (くりやがわ つねもと)	
1979	東北大学工学部精密工学科卒業
1984	東北大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学
1984-1990	東北大学工学部 助手
1987	東北大学工学博士
1990-1992	東北大学工学部 講師
1992-2002	東北大学工学部 助教授
2003-現在	東北大学大学院工学研究科 教授
2014-現在	東北大学大学院医工学研究科 教授
2014-現在	日本学術会議 会員

専門技術分野:

ナノ精度加工学, 生体機能創成学