医工連携による精密工学の新展開 —機能創成加工が拓く新しいものづくり—*

To the New Frontiers of Precision Engineering Based on Medical-Engineering Collaboration
—New Field of Monozukuri Utilizing Function Generation Machining—

厨川常元**

Tsunemoto KURIYAGAWA

Key words

medical-engineering collaboration, function-generation machining, functional interface, nano- & pico-precision machining, nano/micro/macro hybrid structure, hybrid machining, powder jet deposition, hydroxyapatite, Japan Bio-Design Program

1. はじめに

超高齢社会の到来とともに、近年では医療・バイオ分野に関する研究開発の重要性が広く認識され始めている。しかしながら、日本のお家芸である“ものづくり”技術は、こと医療分野においては欧米諸国に大きく後れを取っているのが現状である。この状況を打破するため、われわれは“機能創成加工”を提案している。本報では、医療・バイオ関連の実用研究と、わが国で最初に東北大学に設置された医工学研究科で行っている医工連携アントレプレナー教育、ならびにリカレント教育について紹介する。

2. 機能創成加工とは¹⁾

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、半導体デバイス等の開発・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震災、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置いた“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、超高齢社会対応をキーワードとした対象の変化である。そこで、われわれは超精密ものづくりの次に来るべき技術の一つとして“機能創成加工”を提案している。

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二つである。近年、この加工精度の要求はますます厳しくなり、今やナノ精度を卓越し、ピコ精度に達するものも出てきた。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. 解決のキーワードは“複合”

3.1 形状の複合

機能を発現させるためには、製品の構造自体が複合構造となっているものが多い。図1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¹⁾である。例えば、この図

図1 ナノ・マイクロ・マクロ複合構造体

*原稿受付 平成29年10月15日

**正会員 東北大学大学院医工学研究科（仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01）

図2 3D 超音波振動援用マイクロ加工

図3 3D 超音波振動援用研削で作製した 500 nm ピッチの周期構造体

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、さらにその上に数百 nm ピッチの微小突起が形成され、モスアイ構造が形成されていれば、無反射機能を有する高機能屈折・回折複合光学素子となる。

3.2 加工法の複合

さて、このような複合構造体を得るためには、従来の機械加工法を単独で使用せず、複合させて使用することにより、大幅な機能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）²⁾である。図2に、われわれが開発した3D 超音波振動援用マイクロ加工装置の概略を示す。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等を制御することにより、仕上面に周期的な微細構造（マイクロテクスチャー）を創成することが可能となる。

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、ジルコニアセラムックス表面を加工した場合、図3に示すようなテクスチャーを創成することができる。この例は、送り速度、振動周波数等を変化させ、周期が500 nmになるように調整したものである。このような表面は、使用材料や微細構造を変化させることにより、無反

図4 噴射加工における除去から付着への遷移現象

図5 パウダージェットデポジションにより成膜されたハイドロキシアパタイト厚膜

射、防曇、防汚、撥水・浸水など、さまざまな機能を発現させることができるものと期待されている。

そのほかにも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³⁾や、超音波加工と研削加工と電解作用の三つを複合させた超音波振動援用電解研削⁴⁾なども開発されている。

4. 医療への応用

4.1 パウダージェットデポジションによる機能創成

次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 ～数十 μm の微粒子を小径ノズル（内径0.1～1 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、通常は図4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～数 μm の場合、脆性破壊は起こらず、逆に粒子材料自体が固着成膜してしまう（図4右図）。約250～350 m/sの速度で衝突した粒子は約数nm～数10 nmの微小片に破碎されるが、その表面は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と略記する）と呼ぶ。

このPJDにより、ヒト歯表面のエナメル質（約96%が

図7 量子動力学法による衝突界面での原子挙動

図6 SPH 法を用いた粒子衝突時の挙動解析

ハイドロキシアパタイト Hydroxyapatite, 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⁵⁾⁶⁾。図5は、エナメル質上に成膜した HA 膜の断面写真である。また、図6は SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法により、粒子が基板に衝突する際の破碎挙動を可視化したものである。数 ns の短い時間で数 nm の粒子に破碎されていることが分かる。さらに図7は、量子分子動力学法により、HA 粒子と HA 基板との界面での原子間結合の変化について検討したものである。これらの結果より、HA 粒子は HA 基板に原子結合により固着していることが分かる⁷⁾。

さらに現在、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ろう。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。これらはいずれも、まったく新しい予防歯科、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。

4.2 レーザ照射による機能創成

バイオマテリアルには、生体組織や細胞に対する高い親和性が求められる。われわれは、さまざまな表面創成プロセスを利用して「生体に優しい」表面づくりに取り組んでいる。例えばレーザー照射を利用することにより、チタン系材料に対して生体に活性な機能を付与することに成功している⁸⁾⁹⁾。このような機能をもつ材料を生体内に埋入すると、表面にハイドロキシアパタイト (骨や歯の主成分) を

自然に析出させることができる。この方法を利用すれば骨との固着性に格段に優れたインプラントの作製が可能であり、人工関節や歯科インプラントなどへの応用が期待できる。

5. 研究成果の社会実装

これまで精密加工技術が医療分野に効果的に応用されている事例を示した。今後、ますます精密工学に対する期待が大きくなっていくであろう。近年、大学においても、工学の分野では研究成果を社会実装することが強く求められるようになってきている。一般的に、研究シーズを生かすような事例を見つけ出すことができればいいのであるが、医療機器あるいは医療技術の開発においては、このようなフォアキャスト的方法で成功するのはかなり困難である。したがって、これからの“ものづくり”を考えると、将来何が求められているのか、何が売れるのかを十分予想し、バックキャスト的発想で、そのための技術は何か、今解決すべき技術課題は何かを考えていかなければならない。

東北大学では2008年4月に、医工連携教育研究を実現するためのわが国初の医工学研究科を設置した。医学・生物学の知識が乏しい工学系出身者に対して、分子レベル・細胞レベル・臓器レベルの医学を体系的に学べる授業群を前期課程の第1セメスターに集中させ、分子生物学実習・生理学実習・病院見学等、医学的なニーズを初期段階で徹底的に学習させる。一方で、医学・生物系出身者には、工学系基礎科目を履修させることにより、革新的な医療機器開発に取り組む素養を身につけさせる。

さらにこれらの基礎教育を基盤に、医療機器のイノベーションを担う人材を育成するプログラム、ジャパン・バイオデザインプログラムを2015年10月から開始した。これは、米国スタンフォード大学で行われているスタンフォードバイオデザインプログラムの日本版として、東京大学、大阪大学との協同で立ち上げたアントレプレナー人材育成プログラムである。工学、医学、ビジネスの多様性のあるバックグラウンドをもったチームを編成し、実際の医療現

図8 ジャパン・バイオデザインにおける医工連携プロジェクトベースラーニング

場に身を置いて観察からニーズを発掘する。このようなニーズ探索、コンセプト創造、事業化などのステップを図8に示すようにプロセス化しながら、医療機器開発をプロジェクトベースラーニング形式で実践する。同時に知的財産、規制対応、保険償還、ビジネスプランニングに関しては、“Real World”の専門家からのメンタリングを受けながら行うのも特長の一つである。すでに21名の修了生が出ており、医療関連分野で活躍している。

さらに近年では、これまで医療分野にまったく関係なかった企業が、新たに進出するというケースも多くなってきている。そこで医学専門用語に不慣れな工学研究者のために、基礎医学から臨床医学のエッセンスを短期間で、しかも実験・実習を通じて体得する社会人技術者を対象とする再教育プログラム、REDEEM (Recurrent Education for the Development of Engineering Enhanced Medicine)を開発した。このような再教育システムは、精密工学技術を医療応用する際に必要不可欠である。すでに修了者は400名を超え、多くの企業で活躍している。

5. お わ り に

本報では機能創成加工とその医工連携分野への応用事例に関して紹介するとともに、東北大学医工学研究科で行っている種々の教育システムについて紹介した。精密工学は医工連携におけるキーテクノロジーの一つである。今後、その役割はますます大きくなるであろう。今後の開発研究の進展が、非常に楽しみである。

参 考 文 献

- 1) 厨川常元：機能創成加工が拓く新しいものづくり，Panasonic

Technical Journal, **62**, 2 (2016) 4-8.

- 2) 嶋田慶太ら：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，**54**, 1 (2009) 37-40.
- 3) 益子直人ら：微細構造金型加工に対するレーザ援用マイクロ切削法に関する研究，砥粒加工学会誌，**59**, 10 (2015) 588-593.
- 4) S. Kobayashi et al.: Development of an Ultrasonically-Assisted Electrolytic Grinding System, Int. J. of Automation Technology, **7**, 6 (2013) 654-662.
- 5) R. 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 (2011) 210-216.
- 6) 佐藤慧ら：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)，**79**, 808 (2013) 109-117.
- 7) 水谷正義ら：パウダージェットデポジション (PJD) における粒子破碎挙動と成膜メカニズムに関する研究，砥粒加工学会誌，**61**, 1 (2017) 28-33.
- 8) 水谷正義ら：純チタンへのナノ秒パルスレーザ照射による生体活性表面の創成，砥粒加工学会誌，**59**, 1 (2015) 17-22.
- 9) M. Mizutani et al.: Improved Cytocompatibility of Nanosecond-Pulsed Laser-Treated Commercially Pure Ti Surfaces, International Journal of Automation Technology, **8**, 1 (2014) 102-109.

厨川常元

1984年東北大学大学院工学研究科精密工学専攻博士課程単位取得退学。工学博士。1984年東北大学工学部助手，1990年同講師，1992年同助教授，2003年より工学研究科教授。現在は医工学研究科・研究科長・教授。精密工学会フェロー，砥粒加工学会会長，日本学術会議会員。