ナノ精度マイクロ機械加工の現状と将来*

Future Technologies of Nano-Precision Micro/Meso Mechanical Manufacturing

厨川常元**

Tsunemoto KURIYAGAWA

1. はじめに

21世紀は高齢化社会といわれており、安心かつ安全で質の高い生活を実現するためのデバイスやシステムへの要求が高まりつつある。このようなデバイスがますます複雑化、微細化していくことは必至であり、これらを製造するための“ものづくり”技術も高度化していかなければならない。そのためには、NT (Nano-Technology), IT (Information Technology), BT (Bio-Technology), MT (Manufacturing Technology) 等の基盤技術を根本から究明し、有機的に融合することが重要になるであろう。今後、MT分野のフロンティアを目指し、ナノ精度マイクロ機械加工技術 (Nano-Precision Micro/Meso Mechanical Manufacturing: M⁴ process) の新しい加工原理の創出と、その科学的解明ならびに実用化を視野に入れた研究が重要視されてくるものと考えられる。

2. ナノ精度機械加工技術

2.1 次世代非球面光学素子の新加工法—超安定・超精密非球面研削—

光デジタル機器や光情報通信機器、内視鏡などの高度医療機器のキーパーツである非球面レンズやミラーには、さらなる高精度、高精細、高信頼性が強く求められている。本研究の目的は、現在、国内の非球面レンズの主流を占めている樹脂製非球面レンズをガラスに置き換えるとともに、いまだ解決されていない加工形状誤差の揺らぎ発生を抑制することにより、現状の非球面ガラスレンズの形状精度を飛躍的に高める手法と加工システムを開発することである。これまで開発してきた、形状精度を向上させることのできる円弧包絡研削法、仕上げ面粗さを向上させることのできるパラレル研削法、研削鏡面のナノトポグラフィー創成機構シミュレーションなどのシーズを基盤として、世界で初めて超安定・超精密非球面研削加工システムの開発を行った。このシステムを用いることにより、ガラス製非球面レンズならびにガラスプレス用超硬金型の超精密研削

加工に成功した。その結果、非球面の加工精度が飛躍的に向上し (形状精度 ± 25 nm, 表面粗さ 18 nmRy), その加工表面に形状誤差パターンがないガラス製非球面光学素子が研磨レスで得られるようになった。

2.2 半導体・光学結晶のナノ表面および新機能創成—硬脆材料の超精密延性モード切削加工—

半導体や光学結晶 (Si, Ge, CaF₂), ガラス等の硬脆材料であっても一定の条件を満たせば金属切削と同様に延性モード加工が可能である。すでに単結晶ダイヤモンドバイトを用いて半導体基板や非球面レンズ・フレネルレンズ、自由曲面および微細溝を短時間で超精密加工する技術が開発されている。本加工技術は赤外線光学系の小型化・高機能化、大型液晶ディスプレイの高画質化などに大きく貢献するものと考えられる。さらに、ナノインデンテーション法やレーザラマン分光法などを用いて加工変質層 (Subsurface Damage) の評価を行い、ナノレベルの加工における微視的な材料変形・破壊・相転移機構を解明するとともに、全く新しい表面機能の創成を目指している。

3. マイクロ機械加工 (M⁴ プロセス) 技術

近年、マイクロレンズアレイ、ホログラム光学素子、光導波路などのように、シリコン以外の材料からなるマイクロ部品のニーズが高まってきている。これらの大きさは1 mm以下のいわゆるサブミリサイズのものもあり、形状も複雑である。しかも材料自体も高硬度、高脆性、高融点のものが多いため、前述したようなリソグラフィ技術はもちろん、レーザ、電子ビームなどの熱的加工が不向きで、その加工は特に難しい。また加工能率、加工コストの点からも、低コストな高能率微細加工法が望まれている。しかしこのような10ミクロンからサブミリサイズの加工技術に関してはいまだ確立されておらず、将来の技術確立へ向け、極めて重要な研究領域であると考え、機械的な方法でこのようなマイクロ加工を行うマイクロ機械加工 (M⁴ プロセス) の新しい加工原理の開発が行われている。

3.1 マイクロパーツの超精密・超平滑加工—電気粘性流体援用マイクロ非球面研磨—

これまで非球面の研磨加工は、もっぱら熟練者によるハンドポリッシング、あるいは小さな研磨パッドをNCで走査させることにより行われていた。しかしマイクロ非球面の場合、小さな研磨パッドを作製すること自体難しく、加工域を微小領域に限定することも困難である。また遊離砥粒加工において加工能率を高めるためには、多くの砥粒をいかに研磨領域に確保し、その状態を長く維持するかが

*原稿受付 平成20年10月24日

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

厨川常元

1987年3月東北大学大学院工学研究科 (精密工学専攻) 博士課程修了。1992年東北大学助教授工学部。2003年東北大学教授大学院工学研究科。専門分野はナノ精度機械加工、M4プロセス、パウダージェット加工。

(a) 電気粘性流体援用研磨原理図

(b) 超合金製マイクロ非球面金型

図1 電気粘性流体援用マイクロ非球面研磨法概略

(a) 除去から付着現象への遷移

(b) ガラス板の上に成膜されたアルミナ厚膜

図2 パウダージェットデポジション

重要な因子となるが、マイクロ非球面の場合には工具と工作物の界面に砥粒を密に集中させることが困難になる。

そこで電界の強さに比例して粘度が増加する電気粘性流体（ER 流体）を援用することにより研磨砥粒を極微小領域に集中させ、研磨する方法が開発されている。その結果、これまで全く行うことができなかったマイクロ非球面の研磨加工が可能となった（図1参照）。

3.2 微細穴、微細溝加工—電気粘性流体援用マイクロ超音波加工—

超音波砥粒加工により、ガラスやセラミックス等の硬脆材料に対しサブミリサイズ（10～数 100μm）の微小穴、微細溝、3次元微小構造体を形成するためのマイクロ超音波加工システムが開発されている。前述の電気粘性流体援用法を採用することにより、多くの砥粒を保持することができるようになり、高品位な加工形状が得られるようになった。

4. パーティクルジェット加工

サンドブラストなどの噴射加工はこれまで精密加工法という範疇では捉えてこられなかった。しかし、微粒子の精密分級分散技術、精密定量供給技術ならびに噴射技術を開発することにより、精密除去加工法の一つとして実用化されるようになってきている。また近年では、図2(a)に示すように噴射粒子を小径化することにより、その粒子材料を付着させるエアロゾルデポジション法やパウダージェットデポジション法など厚膜形成法が開発されている。このようにパーティクルジェット技術は精密除去加工のみならず、付着加工への応用展開、さらには医療やバイオ等の異

分野への広範囲な応用が期待されている。

4.1 パウダージェットデポジション—常温大気圧環境下での高速付着加工—

高精度に微粒子を噴射し、成膜することのできるデジタル式パウダージェットデポジション装置が開発され、室温、大気圧環境下で種々の材料（ガラス、セラミックス、半導体材料、金属材料、ダイヤモンド、プラスチック等）を付着させることが可能になった。本技術は、常温成形・集積化を低コストで可能にするもので、絶縁膜や誘電膜、2次電池用厚膜、表面改質膜等の新機能複合材料の創成におよぶ広範囲な応用展開が期待されている（図2参照）。

4.2 未来の歯科治療を目指して—生体・バイオマテリアル高機能インターフェースの創成—

微粒子噴射による付着現象を利用して、室温、大気圧環境下でハイドロキシアパタイト（HA）微粒子を、ヒトの歯の表面（エナメル質）に高速で衝突させることにより、HA 厚膜を成膜することも可能になっている。本手法は、新しい歯質の再構築を可能にするもので、虫歯治療や予防歯科の分野において、従来の歯科治療を根本から変える技術として注目されている。

5. 今後に期待するもの

これまでの機械加工はいかに高精度な形状を創成するかということのみに注力してきた。しかし今後はこの“形状創成”に、その加工表面上に何らかの機能を発現する構造（例えば、サブミクロンオーダーの周期構造等）を創成する“機能性インターフェース創成”を加味する加工法が提案され、実用化されるものと考えられる。