

高脆性材料および難削材の 微細・精密形状における 芝浦機械製マシニングセンタの加工事例

栗山邦隆¹⁾、福田将彦²⁾
芝浦機械㈱

スマートフォンに搭載される高性能非球面レンズの量産技術など、光学レンズを高精度に生産することにより発展してきたのが超精密加工であり、適用される用途も拡大し、身近なモノづくりの手段になりつつある。超精密加工技術は、金型加工の分野では、寿命や仕上げ面品位の向上を目的とした高硬度材料の採用という業界のトレンドに対応する技術である。プレス用金型の事例では、一般的に用いられている高硬度鋼材からハイスや難削材の1つである超合金への試みが進みつつある。従来では、工具損傷の予測が難しく、多くは放電加工から手仕上げを行う手法が一般的であった。しかし、工具材料の発達から超合金の直彫り加工の可能性が見いだされ、さらに加工機の適切な運用により、より高効率かつ高品位な加工が可能になりつつある。本稿では、微細加工や難削材加工と関わりが深い、超精密加工機に求められる必要な要素を解説し適用事例を紹介する。

鉄系材料に対する微細加工の課題

超精密加工が適用される分野として、LED光学技術との融合製品であるヘッドライトをはじめとする自動車光学部品が挙げられる。自動車光学部品の金型製作では、グレア対策としての曲面上に配置された微細構造パターンや、微小反射面を多数配置したクリアランスランプなどは、従来行われてきた手仕上げ工程による加工面品質の向上

が難しく、機械加工による鏡面加工が求められている。

LED光学系の特徴として、高い耐久性やエネルギー効率だけではなく、設計の柔軟性が挙げられる。自動車のデザインの中核になるヘッドライトでは、高級車をはじめとして、LED光学技術のメリットを最大限に活かすさまざまな形状が提案されている。さらに、配光特性など従来光源よりも厳しい品質が求められることが多く、複雑かつ高品質な金型加工が必要となることを意味している。

スマホ搭載非球面レンズ用金型の加工では、無電解NiPめっき処理された金型に対して単結晶ダイヤモンド工具を用いて1nmRa以下の高品位鏡面を実現しているが、自動車光学部品では、量産におけるコストの観点から、めっきをしない高硬度鉄系金型を用いつつ、10nmRaレベルの鏡面性が求められる。従来の金型加工では、高い回転性能をもつエアスピンドルと、ダイヤモンドと類似した材料特性を持ちながら鉄系材料との親和性が低いCBNエンドミルを組み合わせ加工することが多いが、工具刃先の微小な凹凸が加工表面に転写されるため、達成できる加工面品位が20nmRa程度となり、研磨などの手仕上げを行う。

近年では、刃形状を持たない球面形状のPCD工具による高品位鏡面加工が提案されているが、工具の構造上多刃の研削工程に近いいため、適用できる形状が限定され、極微小切れ刃であることが

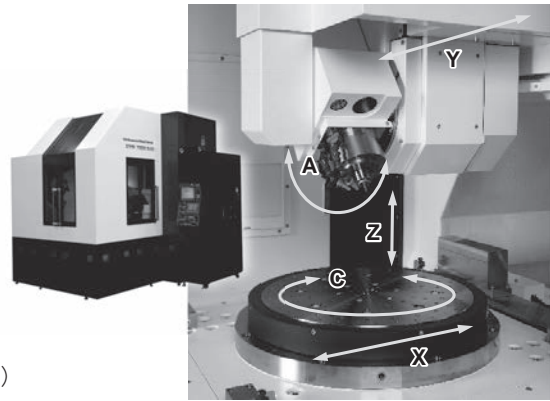


図1
超精密5軸MC UVM-700 E (5 AD)

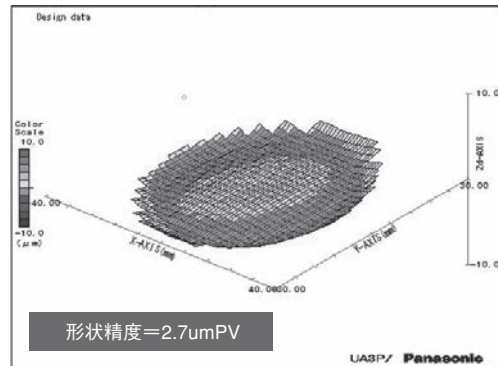
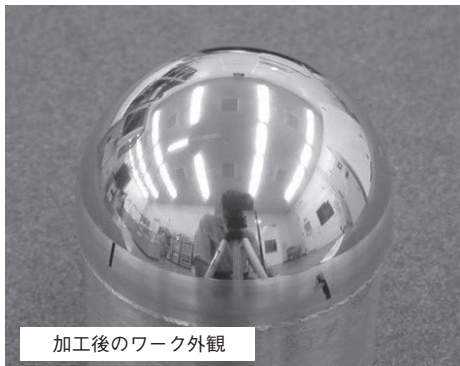


図2 5軸制御動作検証加工

ら、切込みなどの加工条件が低く抑えられ、微細形状を持つ金型加工では十分な加工効率を得られない。そこで筆者らは、単結晶ダイヤモンド工具を用いて鉄系材料の鏡面加工が可能な楕円振動切削に着目し、ヘッドライト用導光体の金型加工について提案を行っている。

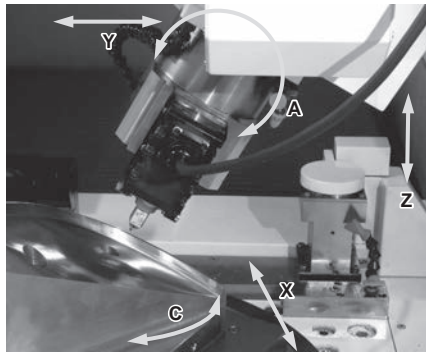
単結晶ダイヤモンド工具は、鋭利な刃先と高い輪郭精度を持ち、引き切り加工を行うため、ミリング加工で懸念される回転主軸の運動誤差がなく、高品位鏡面が期待できるが、その半面、加工点に対する機械挙動の影響が大きくなり、加工機の持つ運動性能が重要視される。

図1では、直線3軸と回転2軸から構成される5軸マシニングセンタ (MC) 「UVM-700 E (5 AD)」を示しており、自動車光学系金型のような大形ワークを搭載しながら高性能な運動性能が得られるように回転軸を主軸側とワーク側のそれぞれに分離した機械構成となっている。直線軸には0.5 nm 分解能スケールフィードバックのリニアモータ駆動を採用し、ワーク回転軸 (C) には1/100000° 分解能とエアテーブルを採用し、150 min⁻¹における回転非同期誤差では30 nm を達成

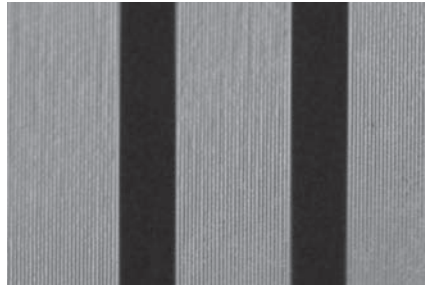
している。5軸同期動作による球面切削を行ったところ、加工面全体にわたって癖のない滑らかな加工面が得られており2.7 μmPVの形状精度を達成している (図2)。

鉄系金型の鏡面加工事例

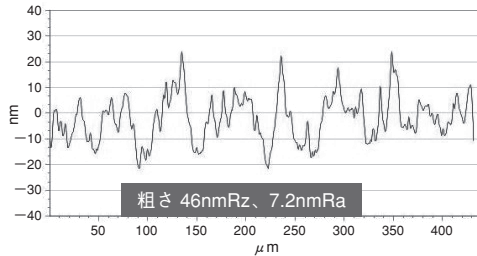
図3に自動車クリアランスランプ用金型加工時の段取りを示す。主軸先端に楕円振動切削ユニットを取り付け、単結晶ダイヤモンド工具による引き切り加工を行っている。同図 (b) に自由曲面と溝形状が組み合わされた部位の加工面を示している。自由曲面部に見られるすじが切削軌跡を示しており、図中の上から下へ工具が走査し、左右方向にピックフィードを行う。緩やかに湾曲した曲面上や溝部に対して、常に一定の姿勢を維持しながら走査をさせながら、高品位鏡面加工を達成するため、同時5軸制御を行いながら加工点において安定したナノメートルオーダーの位置決めが必要となる。曲面部を微小3次元測定機で評価したところ、刃先通過位置のばらつきが数十 nm 程度に抑えられており、46 nmRz と急峻な凹凸の



(a) 楕円振動切削時の5軸動作



(b) 顕微鏡写真



(c) 楕円振動切削による加工面性状
(ZYGO 製 NexView)

図3 楕円振動切削を用いた加工事例

ない滑らかな面性状を示している。仕上げ面品位としても 10 nmRa 以下を達成しており、良好な加工面性状を示している（同図(c)）。

超硬直彫り加工の課題

超硬合金は典型的な高硬度脆性材料の1つであり、切込み深さによって、切削状態が脆性モードと延性モードを生じることが知られている。高品位切削加工面を得るためには、安定した延性モードを維持することができる臨界切り取り厚さ以下を維持することが必要である。サブナノメートルオーダーで切込み深さを制御することにより、その可能性を実証されているものの、段取りや再現性のある加工状態を得ることが難しく、量産性が求められるミリング加工では実用性に乏しい。しかし、高硬度かつ耐摩耗性に優れたダイヤモンドコーテッド工具など工具技術の発達により、量産性に優れた超硬直彫り加工が注目されつつある。ただし、微細形状金型など手仕上げが困難な金型への高品位加工面を得るためには、脆性破壊によるダメージ層を最小限とし、限りなく延性モードに近い仕上げ加工を行うことが求められる。つまり、延性モードを安定して維持できる機械挙動が必要となる。

シリコンやゲルマニウムなどの脆性材料では、リニアモータ駆動による高い位置決め性能とエア

スピンドルによる高い回転性能を備えた加工機を用いることにより、安定した微小な切り取り厚さを維持することができ、延性モード切削加工が実用レベルに達している。そこで、筆者らは超精密MCを用いた超硬直彫り加工について、加工面品位に影響を与える工具特性機械挙動を検討している¹⁾。上述の脆性材料に対する延性モード加工と異なるのは加工領域が確保され、エンドミル工具を用いたミリング加工ができるなど、汎用性と量産性が求められる。検討に用いた加工機「UVM-450 D (H)」では、高精度リニアガイドとコア付きリニアモータの組み合わせにより、10 nm ステップを加工点で達成する制御性の高い追従性を実現している。また、工具スピンドルには、最高回転 60,000 min⁻¹ の自社製エアスピンドルを搭載し、回転ごとの振れ量が 100 nm 以下と極めて高い回転精度を達成している（図4）。

高品位超硬直彫り加工

これらの要素技術を用いた代表的な加工事例として、図5では、ダイヤモンドコートエンドミルとPCD工具とは異なり、鋭利な刃形状を持ったPCDエンドミルによる超硬材に対する加工面品位の比較を示している。

ダイヤモンドコートエンドミルでは、顕著な脆

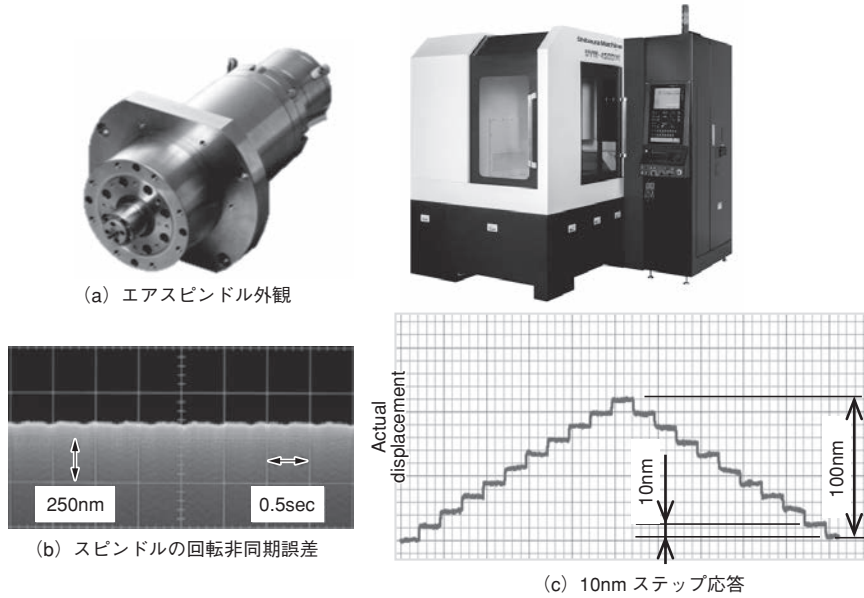


図4 超精密3軸MC UVM-450 D (H)

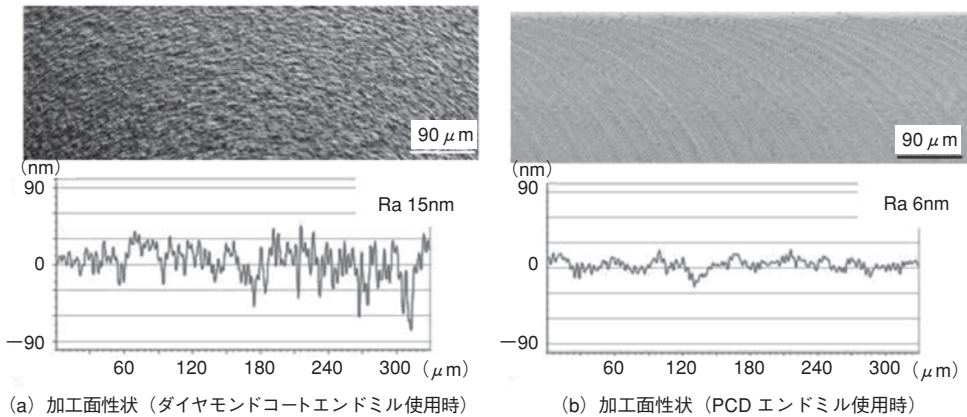


図5 超硬合金直彫り加工事例

性破壊が生じることなく加工できているが、脱粒または微小な脆性破壊が生じていることがうかがえる加工面となっている。一方、PCD エンドミルでは、延性モード切削が認められる切削痕が認識でき、10 nmRa 以下となる良好な加工面を得られている。つまり、延性モードに必要な臨界切り取り厚さを成立させる機械動作と、その条件化で良好な切削性を示すことができる工具特性とを適切に組み合わせることにより、高品位な超硬直彫り加工が可能であることを示している。

☆ ☆

本稿では、鉄系材料に対する微細加工と高品位超硬直彫り加工について紹介した。両者とも市場要求は高度化しており、前者では、EV シフトや

自動運転技術の向上にともない、光学部品が高度かつ複雑化し、さらなる高品位微細加工が求められている。後者においては、加工面品位の向上には、さらに高いレベルの延性モード切削が求められる。同時に仕上げ加工時には特殊な工具を用いることも必要になると考えられる。したがって、今後は工具技術、機械技術だけではなく、これらを効果的に運用するプロセス技術への検討が求められると考えられる。

参考文献

- 1) 牧田丈晴、比佐遼太、栗山邦隆、福田将彦：エアスピンドルを用いた超硬合金の超精密ミリング加工, 2020 年度砥粒加工学会学術講演会論文集, 59-60