超精密切削加工と そのアプリケーション

Ultrahigh Precision Cutting and the Applications/Yutaka YAMAGATA

(独)理化学研究所 山形 豊

1. 超精密切削加工の歴史

レンズは、紀元前から存在していたといわれており、13世紀ごろには眼鏡としてレンズが用いられていたようである。17世紀初頭には屈折式望遠鏡が発明され、その後ニュートンが反射式望遠鏡を発明している。当時から、比較的最近に至るまでレンズや反射鏡などの加工には一貫して遊離砥粒による研磨が利用されてきた。遊離砥粒による研磨手法は、球面の対称性を利用することで比較的容易に高精度な球面形状を作成することが可能であり、こうした研磨加工技術の進歩と、光学設計の進歩により複数枚のレンズを組み合わせることで、光学特性の優れたレンズが多数生産された¹⁾。

1980年初頭ごろに米国を中心として、超精密切削加工技術の研究開発が始まった。当初は主に軍事目的であったとされているが、空気静圧軸受けとレーザー測長器を装備したNC制御超精密加工装置によりレーザー集光ミラーなどが開発された。従来は、時間のかかる研磨加工により製作されていた超高精度な光学素子が、材料が軟質金属やプラスチックに限られるとはいえ、数分から数十分の切削加工で作成可能となったことは大変画期的なことであった。1980年後半に入ると、比較的小型な超精密加工装置が開発され、日本でも民間企業を中心に導入が開始された。また、国内でもレーザー加工機用金属ミラー加工装置の開発プロジェクトが国の主導で進められ、超精密加工装置の基礎技術が構築された。その後、国産の超精密加工装置も多数開発され、ハードディスクのメディア、ポリゴンミラーなど様々な民生用機器の部品加工に使用されるようになった。CDプレイヤーが発売されると、光ディスクピックアップ光学系のコストダウンのため、ガラスプレスモールドやプラスチック射出成型による非球面レンズの開発が活発化し、超精密加工装置は多数使用されるようになった。1990年代後半には、1 nm以下の制御分解能をもつ多軸超精密加工装置が開発されるようになり、ホログラム光学素子などのナノメートルレベルの微細構造をもつ素子も超精密切削により加工されるようになった。

2. ダイヤモンド工具と被加工材料

単結晶ダイヤモンドは、いまのところ最も硬い材料であり、超精密切削加工といえば、単結晶ダイヤモンド切削

(SPDT: Single Point Diamond Turning と呼ばれる) の工具として欠かせない材料である²⁾³⁾。ダイヤモンドの次に硬い材料としては、cBN (Cubic Boron Nitride: 立方相窒化ホウ素) があるが、cBNは天然鉱物としては存在せず、単結晶材料の製造が困難なため、光学素子などの超精密加工には、あまり用いられていない。超硬合金は、タングステンカーバイドを焼結した合金であり、多くの金属材料の切削に効果的な工具として広く使用されているが、硬度は単結晶ダイヤモンドの方がかなり高い。単結晶ダイヤモンドは、天然のものと人工のものがあるが、人工ダイヤモンドの品質は天然のものよりも安定しており、かなり広範囲に工具として使用されている。単結晶ダイヤモンドは、結晶の方位により硬度や耐摩耗性が大きく異なり、工具の作成にはこうした方位、研磨方向に関するノウハウが欠かせない。これらの高硬度材料の比較を表1に示す。図1には、各種切削工具の刃先の拡大写真を示す。超硬合金製工具や結晶ダイヤモンド工具と比較すると単結晶ダイヤモンドの刃先の滑らかさがわかる。単結晶ダイヤモンド工具の切れ刃の半径は数十 nm から数 nm が可能とされている。

また図2には、微細な先端形状をもつ工具の写真を示す。このように μm ～サブミクロンの微細な先端形状を有する切削工具も単結晶ダイヤモンド工具によれば製作可能であり、ナノメートルオーダーの微細構造形成に欠かせない道具となっている。

被加工材料は、主に銅やアルミニウム、真鍮などの軟質金属が主なものである。リンの含有率を高めアモルファス構造に近い結晶構造をもつ無電解ニッケルリンメッキは、硬度の高さに比較してダイヤモンド工具の磨耗が少ないため、現在では多くのレンズ金型の材料として使用されている。

表1 各種工具材料の代表的特性

性質	単位	ダイヤモンド	cBN	超硬合金
スラブ硬さ	GPa	60~100	45~50	18~22
ヤング率	GPa	1000	8.9	450~650
密度	g/cm^3	3.5	3.5	13~15
熱伝導率	W/mK	600~2100	1300	40~100
耐熱温度	K	600~1700	1300~1600	1700
化学的活性金属	—	W, Ta, Ti, Zr, Fe, CoMn, Ni, Cr など	—	—

数値は代表的なもので、条件により異なる。

図1 各種工具刃先の拡大写真

(左から、単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、超硬合金、上：単結晶ダイヤモンドバイト全体、工具拡大写真の刃先半径はいずれも 0.5 mm)

図2 微細ダイヤモンド工具の例

(左：30 μm 1 枚刃エンドミル 右：剣先バイト先端 R100 nm 以下)

る。

ステンレス鋼などの鉄系材料は、金型材料としては理想的な特性を備えているものも多いが、単結晶ダイヤモンド工具で加工した場合は、炭素が被加工材と化学反応を起こし急速に磨耗が進むため、単結晶ダイヤモンド工具による超精密切削加工にはほとんど用いられない。こうした現象は、炭素を固溶する多くの金属材料に対して見られ、化学磨耗とも呼ばれる。

また、ガラスやシリコン、ゲルマニウムなどのように従来は脆性材料のため、切削は不可能であると考えられていた材料も、極めて小さな切込み量（およそ 100 nm 以下）により加工することで、金属材料と同様の延性モードで加工することが可能であることが判明しており、赤外線用レンズなどの作成に応用されている。

3. 超精密加工装置

超精密切削加工技術は、超精密加工装置の高精度な運動軌跡を単結晶ダイヤモンド工具により被加工物へと転写することにより達成される。超精密加工装置なくして超精密切削加工技術の発展はあり得ないといえる。さらにこうした超精密加工装置の開発は、案内機構、送り機構（モータ）、測長システム、制御装置といった超精密機構要素技術の発展が基礎となっている^{4)~6)}。

図3 超精密加工装置の精度測定例

図4 1 nm 制御超精密加工装置の例（1995 年）

NC 工作機械の発明は 1960 年ごろに遡るが、超精密切削加工の実現には、ナノメートルレベルの精度の実現が必要であり、80 年代初頭から研究開発が開始されている。

案内機構としては、空気静圧案内（直動、回転）、油静圧案内、ローラー式などが開発されている。送り機構に必要な要件としては、真直度、送りの再現性、剛性、温度に対する安定性などが上げられる。近年の案内機構は、数百 mm 程度のストロークでも数百 nm 以下の真直度と数十 nm 以下の再現性を有している。図 3 に静電容量式微小変位計による真直度とステップ駆動の例を示す⁷⁾。また、図 4 には 1 nm 制御の 4 軸超精密加工装置の写真を示す⁸⁾。

送り機構は、当初は、高精度台形ネジから始まり、ボールネジや静油圧ネジなどが使用されて来たが、近年では、リニアモータによる直接駆動が主流となりつつある。リニアモータを使用することで、ボールネジ等の回転イナーシャがなくなるため、高速な駆動が可能だけでなく、ネジの振れ回りや送りピッチに起因する周期的な運動誤差をも低減することが可能である。

レーザー干渉計は、精密測長器として最も広く使用されていたが、大気の影響による影響などのため、徐々にリニアスケールへと置き換えられていった。リニアスケールは、ガラス等の表面にフォトリソグラフィあるいは写真ホログラムの原理により微細なラインを形成し、レーザー光により読み取るもので、低熱膨張材料を用いることで、温度の影響を極めて少なくすることが可能であり、また大気

図5 プラスチックレンズ金型の加工事例
(左: $f\theta$ レンズ金型, 右: 軸対称非球面レンズ金型)

図6 大型プラスチックフレネルレンズの加工例
(左: 加工前, 右: 超精密切削加工後, レンズ直径 500 mm)

の屈折率変化等の影響もほとんど受けない。スケールから得られる信号はおよそ数百 nm 程度のピッチで出力されるが、これを電氣的に分割することで、最先端のリニアスケールでは、0.1 nm 程度とおよそ原子 1 個の大きさの分解能をもつものもある。

こうした機構要素を統合的に制御するのが NC 制御装置である。NC 制御装置は、半導体製造技術の長足の進歩により、ここ十数年で急速に進歩した。単純な位置・速度制御ループを持つ機構から、予測制御や機構要素の誤差補正、適応制御やモータのデジタル制御を行うことのできる NC 装置も出現している。ナノメートルレベルの超高精度な形状を加工するためのデータは、数値制御指令にすると数百メガバイトを超える膨大な量となるが、こうした大量のデータも高速に処理することが可能となっている。

4. 超精密切削加工技術の適応分野

超精密切削加工の現在最も多い応用例は、非球面プラスチックレンズ用金型であろう。無電解ニッケルリンメッキを用いることで、比較的短時間に高精度（形状誤差 100~200 nm, 表面粗さ数 nm）が得られるため大変生産性が高く、デジタルカメラ、光ディスクのピックアップ光学系、レーザープリンターのスキャン光学系などに広く用いられている。図 5 にレンズ金型のコアの加工例を示す。

金型を用いずに直接にアクリルなどのプラスチック材料を切削することも可能であり、少数個しか製造されない科学分析機器などの特殊な非球面レンズ等に多く用いられている。図 6 に示すのは、直径 500 mm のアクリル製非球面フレネルレンズの加工例である。左のようなすりガラス状の素材を単結晶ダイヤモンドバイトにより切削し、透明なフレネルレンズが製作されている⁹⁾。

図7 ホログラム光学素子の加工例
(左: 金型, 中央: ホログラム部分 ($\phi 3$ mm), 右: 溝の SEM 写真, ピッチ約 3 μ m)

図8 微細構造部品の形成例
(左: 直径 100 μ m, ピッチ 20 μ m のネジ, 右: 10, 50, 200 μ m の段付きシャフト, 材質は共にアルミ合金)

回折格子の製造は、電子線描画装置による方法やルーリングエンジンによる方法などが多く用いられているが、超精密切削加工による方法は、溝の幅や断面形状の自由度が高く、単なる分光に留まらない回折型光学素子の製造を可能としている¹⁰⁾ (図 7)。回折格子よりやや大きな溝形状の製品としては、液晶ディスプレイのバックライトに使用される導光板などがある。超精密切削加工では、溝の谷部先端の R を 1 μ m 以下にすることも可能であり、微細な溝形状の形成には欠かせない手法となっている。

図 8 に示すのは、微細機械構造部品を超精密切削により製作した例である⁸⁾。MEMS 技術 (Micro Electromechanical Systems) として知られる微細加工技術は、フォトリソグラフィによりきわめて微細な構造を形成することが可能であるが、3 次元的な構造の形成にはあまり適していない。超精密切削加工は、3 次元的な構造を形成することが可能であり、各種の微細構造部品の形成に利用されている。

近年では、光学素子以外にも超精密切削加工の応用分野が広がりつつある。その一例は、マイクロ流体チップ (μ -TAS: Micro Total Analysis Systems) である。これは、微細な流路内部で化学・生化学反応を行うことによりきわめて微細な流量で高速・高感度に分析や合成を実施しようとする技術である。図 9 にマイクロ流路の金型をダイヤモンド切削加工により形成した例と、これによるプラスチック成形品の写真を示す¹¹⁾。

5. 今後の超精密切削

これまで説明したように、超精密切削加工技術は、単結晶ダイヤモンド工具と軟質金属材料の組み合わせにより、非球面レンズから、ナノメートル微細構造、高精度・微細部

図9 マイクロ流路の加工例

(左上：金型中央部のSEM画像 右上：プラスチック成型品の顕微鏡写真 下：マイクロ流路全体図 溝ピッチは500 μm)

品まで様々な超精密加工を実現してきた。超精密切削加工分野において今後の研究開発が期待される技術を著者の希望的観測を含めてあげてみると以下ようになる。

- (1) 高耐熱性・高硬度かつ工具磨耗の少ない材料の開発
- (2) 超精密加工装置のさらなる高精度化と多軸化、高速化とこれを支援するソフトウェアシステムの開発
- (3) 単結晶ダイヤモンドに代わる超高硬度工具材料の開発

こうした技術は半ば夢のような技術はあるが、現在の超精密切削加工技術は、数十年前には考えられなかった夢のような技術であるといってよいだろう。超精密切削加工は、超高精度あるいは微細な構造物を高効率に加工でき、高付加価値な製品や最先端の科学機器を製造する手段として重要な精密加工技術の一つとして今後も発展を続けるものと考えられる。

参考文献

- 1) 吉田正太郎：望遠鏡光学，誠文堂新光社，(1978)。
- 2) 丸井悦男：超精密加工学，コロナ社，(1997)。
- 3) 角谷均ほか：SEI テクニカルレビュー，**165** (2004) 68。
- 4) 江田弘ほか：超精密工作機械の製作，工業調査会，(1993)。
- 5) 超精密加工技術，日本機械学会編，コロナ社，(1998)。
- 6) 田中義信ほか：精密工作法（上，下），共立出版，(1994)。
- 7) Y. Yamagata et al.: Precision Engineering and Nanotechnology, Shaker Verlag, (1999) 342。
- 8) Y. Yamagata et al.: Proceedings of the 8th International Precision Engineering Seminar, (1995) 467-470。
- 9) S. Morita et al.: Advances in Abrasive Technology 4 (2001) 35-38。
- 10) Y. Yamagata et al.: Microelectronic Structures and MEMS for Optical Processing II SPIE Proceedings, **2881** (1996) 148-157。
- 11) 山形豊ほか：精密工学会 2007 年度秋季大会講演論文集，(2007) 119。