

〈12 回連載 ショートレクチャー〉

若手技術者のための研削工学 (第 12 回) 曲面の創成と切断および複合研削

奥山繁樹（防衛大名誉教授）

1. はじめに

前回のレクチャーでは、研削加工の高能率化・高精度化を目指した取り組みの概要とその具体例を紹介したが、曲面の創成や微細加工には触れることができなかった。そこでまず、これらの超精密研削加工について簡単に述べる。

一方、研削加工にはこれまで取り上げていない、心なし研削、歯車研削、研削切断などがあり、固定砥粒加工全般に目を向ければ、超仕上げ、ホーニング、固定砥粒研磨などもあって、それぞれの機能・特性が生産加工に生かされている。ここでは紙面の都合で、精密切断の代表例である、シリコンインゴットなどのスライシングとダイシングを取り上げ、その概要を述べる。

さらに、研削加工の高能率化・高機能化のために、電解、放電、超音波振動など他の加工エネルギーを援用した加工法が開発され、実用に供されている。そこで最後に、電解研削、放電研削および超音波研削の概要を述べて、このシリーズを閉じることにしたい。

2. 微細曲面などの超精密研削

2.1 軸対称非球面の創成

レンズの収差を抑制し、かつレンズ枚数を減らすために、非球面光学部品が用いられる例が多い。

軸対称非球面のガラスレンズやその金型を創成する場合、図 1 に示すように下に向けた砥石頭を前後 (X 軸) 送り台上に設置し、ワーク主軸 (C 軸) を左右 (Z 軸) 送り台に設置して、(X・Z) 同時 2 軸制御して研削加工することが多い。近年では 1nm 分解能の非球面加工機が市販され、非球面レンズやその金型の超精密加工が行われている。仕上げ加工には、レジノイドボンドの微粒ダイヤモンドホイールが用いられることが多い。

一方、曲率半径がさらに大きい曲面の場合には、横軸角テーブルタイプの超精密 CNC 研削盤と、R 付き (縁形がドーナツ状の) 砥石を用い、同時 2 軸制御して創成することが多い。しかしこの方法では、砥石の輪郭精度が加工精度に直接影響する。これを防ぐため、工作物をチルト (傾斜) させて常に砥石の最下点で加工できるように、同時 3 軸制御する方式が採用されることもある。

2.2 微細・複雑形状の創成

近年、光通信用の光学デバイス、光ディスク用のピックアップアプレズなどの微細化、複雑形状化が進められている。生産性向上のため、微細プラスチックレンズは射出成形法で、微細ガラスレンズは高硬度の金型を用いたガラスプレス法によって量産される。このため、微細レンズ金型の研削加工がキーテクノロジーになっている。

(a) マイクロ非球面金型の超精密研削

近似曲率半径が 2mm より小さい凹面の場合には、図 1 に示した方法では加工が難しい。このため、図 2 に示すように砥石軸を工作物の回転軸に対して 45° 傾けて研削する、斜軸研削法が採用される。このとき、非常に小さい砥石が用いられるので、砥石を高速回転さ

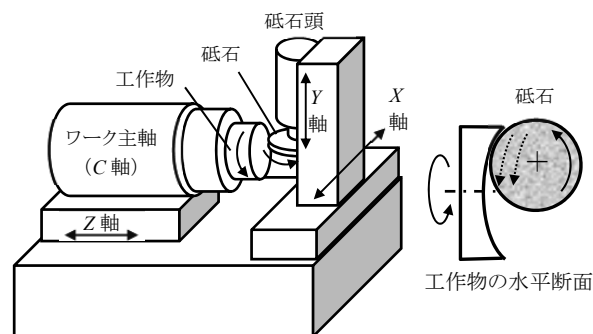


図 1 軸対称非球面金型の研削法

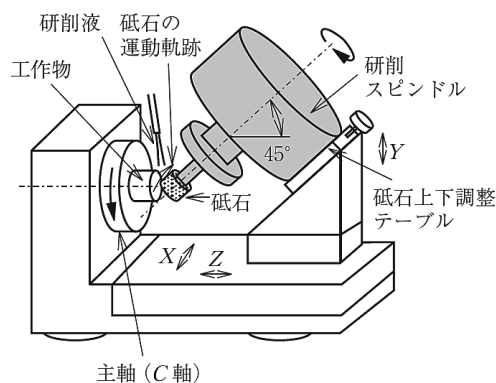


図2 マイクロ非球面金型の研削法

せることによって周速度をかせぐ必要がある。そこで、回転数が 1.5×10^5 rpm に達するような空気静圧軸受が用いられる。空気静圧軸受が採用できるのは、切込みと、砥石と工作物の接触長さが微小で、研削抵抗がごく小さいためでもある。

図3は、鈴木らが近似曲率半径および有効径が約 $250\mu\text{m}$ の超合金製非球面レンズ金型を、 $\phi 300\mu\text{m}$ のレジノイドボンド・ダイヤモンドホイールを用いて加工した例である。このような方法によって、いわゆるマイクロ非球面のレンズ金型を超精密加工できる。

(b) フレネルレンズ金型の超精密研削

フレネルレンズは、通常のレンズを同心円状に分割して厚みを減らしたもので、のこぎり状の断面を有する。これにより、非球面コンデンサ（集光）レンズなどを小型軽量化できる。

図4に示すようなナイフエッジ状の断面を有する砥石を用い、(Y・Z)軸を同時2軸制御することでフレネルレンズ金型の加工を行うことができる。鈴木らは、レジノイドボンドの微粒ダイヤモンドホイールを、粒度 F200 のダイヤモンドホイールを用いて機上でナイフエッジ状にツールイングし、その先端を用いて図5に示す形状の金型を高精度に創成している。

3. スライシングとダイシング

ここでは、電子デバイス用の単結晶インゴットなどを薄く切断するスライシングについて述べる。比較的小さいインゴットのスライシングには、薄いディスク状の外周刃あるいは内周刃が用いられる。図6は外周刃を用いたスライシングの様子を模式的に示したもので、工具には直径 $50 \sim 100\text{mm}$ 、厚さ $50 \sim 200\mu\text{m}$ 程度のダイヤモンドブレードが用いられる。ブレードはフランジで固定

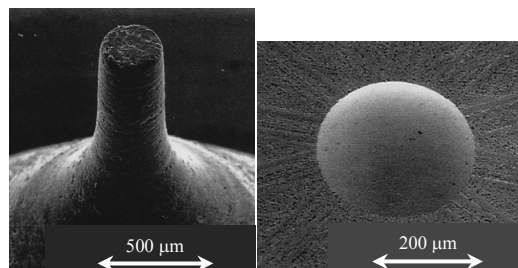


図3 マイクロダイヤモンドホイールのSEM写真(左)と超合金製マイクロ非球面金型のSEM写真(右)

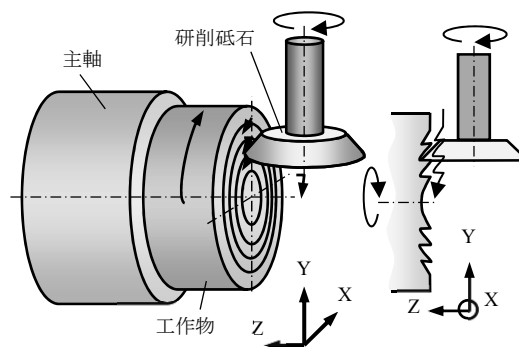


図4 (Y, Z)同時2軸制御によるマイクロフレネル形状の研削法

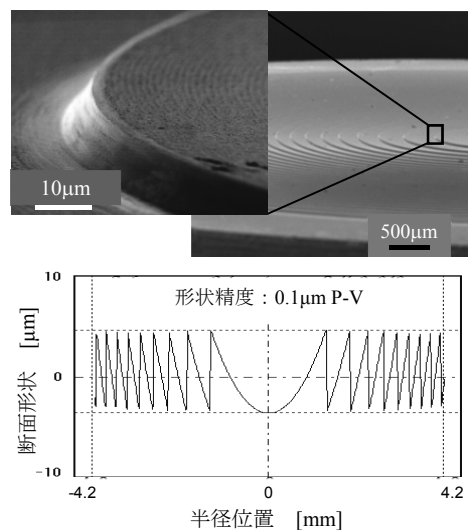


図5 創成したフレネルレンズ金型のSEM写真とその断面形状

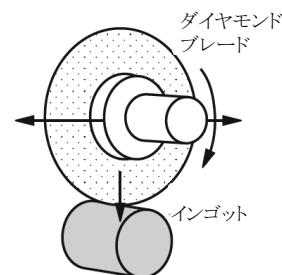


図6 外周刃を用いたスライシングの概要

する必要があるため、ブレード径の 1/3 程度の工作物までしか切断できない。

さらに大きいインゴットの切断には、マルチワイヤソーが用いられる。図 7 は、ダイヤモンド電着ワイヤによるスライシングの様子を模式的に示したものである。平行に巻き付けられた複数のワイヤ(マルチワイヤ)を作用させることで多数のウェハを一度に切り出せる。なおワイヤソーによる切断には、砥粒を電着していないワイヤに砥粒の懸濁液を作用させる方法もあり、広く用いられているが、電着ワイヤを用いた方が加工能率が高い。

ダイシングは、わずかに刃の突き出た薄刃砥石(複数刃のものが多し)を用いて試料を小片に切りそろえたり、ウェハを矩形チップに切り離したりする加工法である。ウェハ上の電子回路パターンの中に設けられる切りしろは $100\mu\text{m}$ に満たないことも多い上に、歩留まりと加工能率に対する要求も厳しい。このため、ダイシング装置には切りしろが極めて狭く、位置決めと運動精度が高く、かつ切断速度が早いことが求められる。

近年は、さらなる歩留まりと生産性向上のために、レーザ加工によるダイシングも行われている。

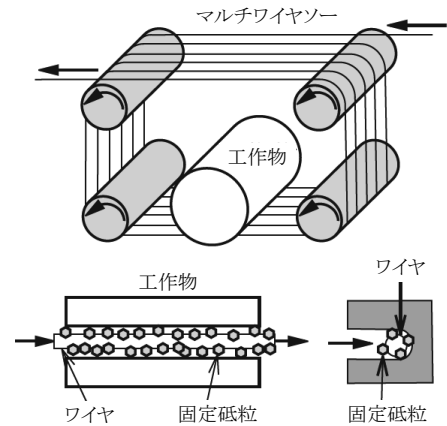


図 7 マルチワイヤソーによるスライシングの概要

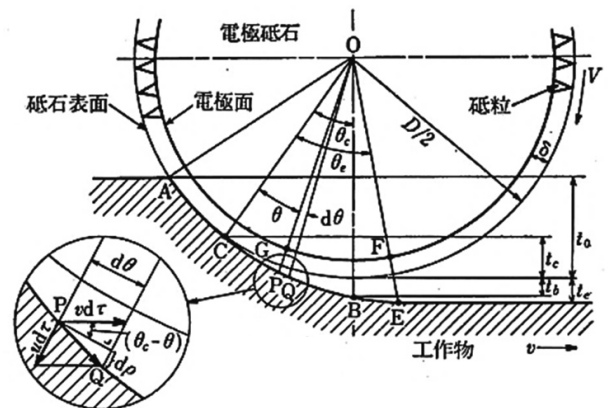


図 8 電解平面研削における仕上げ面の創成モデル

4. 複合(援用)研削

研削加工は、運動転写を基本とした加工法であるので高い形状精度が期待できる反面、超硬合金などの難削材の加工能率に課題がある。一方、電解加工や放電加工は導電性があればほとんどの材料を加工できるものの、仕上げ面の粗さや形状精度に難がある。そこで両者の利点を生かす複合研削法が開発・実用化されている。一方、超音波振動を付加(援用)することによって、加工の能率や精度を高めようとする試みもある。

以下、電解研削、放電研削および超音波研削の概要を述べる。

4.1 電解加工と研削加工の複合化

導電性工作物を陽極(+)に、導電性ボンドの超砥粒ホイールを陰極(-)とし、両者の間に電解液を流しながら通電すると、工作物表面が電解されると同時に、電解生成物の被膜がその表面に生じ、次第に電解速度が低下する。電解研削は、電解生成物を砥石の機械的作用によって除去することで電解作用を活性化させることを狙いとしているが、機械的な除去作用と電解作用が混在する領域で加工を行う場合もある。

電解研削の複合効果は、①加工速度の増大、②研

削抵抗の減少、③研削比の増加、④残留応力の減少、⑤焼けやバリの消滅などである。このため、超硬合金製工具の加工や、ステンレス製注射針先端のバリのない加工などに用いられる。

一方電解研削では、⑥高価な専用機が必要になる、⑦電解作用が支配的な条件では、形状精度と仕上げ面粗さが低下する、⑧廃棄物の処理コストが増大する、⑨超硬合金表層の Co が溶出して、強度が低下する、などの課題がある。

図 8 は、電解平面研削における工作物の除去モデルを示したもの(小野ら)である。P 点における $u d\tau$ は電解加工の速度ベクトルを、 $v d\tau$ は工作物の送り速度ベクトルを、それぞれ示しており、合ベクトルの方向は P 点における仕上げ面の傾きを表している。図の C 点では、合ベクトルの方向と砥石外周の接線方向が一致している。つまり、C 点よりも左側では電解作用を援用しつつ機械的な除去作用が行われるのに対し、C 点よりも右側では電解作用のみによって加工が行われる。したが

って右側に行くほど仕上面の形状精度や粗さが悪くなる。このため、加工の最終段階で電解電源を切り、研削のみによって仕上げるが行われる。

なお、電解加工は研削ばかりでなく、ホーニングやラッピングとの複合化も試みられ、成果を上げている。

4.2 放電加工と研削加工の複合化

放電と研削を複合した加工においては、[I] 軽質油や導電性の低い研削液を用いて、文字どおり放電研削を行う場合と、[II] 電解液を用いて電解・放電研削を行う場合とがあるが、ここでは主に前者について述べる。

放電研削の複合効果は、① どちらか単独で加工した場合よりも加工速度が増大する、② 導電性があればあらゆる材料を加工できる、③ 加工抵抗が減少するので形状精度が向上し、深穴の内面なども高精度に加工できる、④ 切りくずが放電によって飛散・消滅し、目詰まりが生じにくい、⑤ 砥石のドレッシング効果があり加工の持続性が高められる、などである。

一方、電解液を用いて電解・放電研削を行う場合には、前述の電解研削と同様の課題がある。また電解液を使わない場合にも、⑥ 放電関連の設備を要する、⑦ 放電痕によって粗さが増大する、⑧ 加工面に熱損傷が生じやすいなどの問題点があるが、砥石の損耗が激しい難削材の加工に古くから用いられている。

一方、放電加工用ワイヤがワイヤガイドに接している位置で微細放電加工したり(増沢)、砥粒層のない導電性ホイールを高速回転させて放電加工したりする方法などがあり、「放電研削」と呼ばれているが、実態は放電加工そのものであるので注意を要する。

4.3 超音波(援用)研削

超音波研削は、砥石と工作物間の相対運動に超音波振動を重畳させて加工能率を上げようとするもので、[I] 比較的小さい固定砥粒工具を振動させる場合と、[II] 研削盤のテーブル上に超音波振動装置を設置し、その上に固定した工作物を振動させる場合がある。

図9は[I]の場合における加工の様子を示したもので、振動を拡大するホーンの先端に取り付けた砥石に、振動数 16~30kHz、振幅 0.03~0.1mm 程度の振動を与えることによって、砥石形状どおりの穴加工や研磨が行える。超音波を援用することで難削材の加工や、加工ひずみや熱の影響の少ない仕上げが可能になる。なお本図に示した方式の場合には、工具が砥石である必要はなく、耐摩耗性の高い材料で作製した工具と工作物

の間隙に、砥粒と加工液を供給することで、超音波研磨を行うことができる。

一方、[II]の場合には、汎用の平面研削盤と通常の研削砥石を用いることができる。このとき超音波援用の効果は、① 振動の伸長時に衝撃力が加わり、加工力が増す、② 振動の収縮時に砥石と加工面の間に隙間が生じ、加工液による冷却・潤滑効果が増す、③ 切りくずの排出が良くなり、キャビテーションによる洗浄効果も期待できる、④ 研削抵抗が減少し砥石の寿命も伸びる、などである。このため、難削材の切断や溝切り加工などに用いられる。

① 振動の伸長時に衝撃力が加わり、加工力が増す、② 振動の収縮時に砥石と加工面の間に隙間が生じ、加工液による冷却・潤滑効果が増す、③ 切りくずの排出が良くなり、キャビテーションによる洗浄効果も期待できる、④ 研削抵抗が減少し砥石の寿命も伸びる、などである。このため、難削材の切断や溝切り加工などに用いられる。

5. おわりに

本レクチャーの前段で述べたように、研削における工作物の除去プロセスは難解で、その理論的な取り扱いの基礎となる切れ刃の形状も加工時の刃先位置も不確かで、しかもこれらは時々刻々変化する。つまり、現象を科学的に取り扱う基礎となる加工モデルを作ることさえ難しい。このため、完全とはいえない多くの議論がこれまで展開されて来た。その意味で、皆さんには懐疑の念を持って、このレクチャーを読み返してほしい。また、ご自分の目で研削現象をつぶさに観察して、自身の考えを育む努力を続けていただきたい。

最後に、このレクチャーに長きにわたってお付き合いいただいた読者諸兄に衷心より感謝申し上げ、本レクチャーを閉じることにしたい。

<参考資料について>

この連載記事の内容の多くは、コロナ社から出版した「機械加工学の基礎」をわかりやすくしたものである。さらなる学習を希望される読者には、本書を参考にしていただきたい。また本書の対応部分に、このレクチャーで記述を省略した「参考文献」が記載されているので、ご参照いただきたい。一方、近年の本学会誌の掲載論文は電子ジャーナル「J-STAGE」にアップロードされており、また過去の本会は本会が出版した「DVD アーカイブ全集」にまとめられている。いずれも、キーワード検索ができるので、今後の学習の参考にしていただければ幸いである。

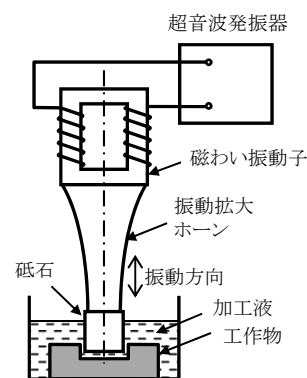


図9 超音波(援用)固定粒加工の概要