

〈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 11 回) 高能率化・高精度化を目指して

奥山繁樹 (防衛大名誉教授)

1. はじめに

研削加工の進歩の方向は、高能率化・高精度化、多機能化・複合化、自動化・知能化、そして環境負荷の低減に向かっているものと思われる。

これらを実現するために研削盤本体では、①回転と直線運動のさらなる高精度化と高速化、②機械構造の高剛性化と減衰性能の向上、③目的に応じた構造の大型化／超小型化、④多軸化・多機能化・複合化、⑤省エネ化などが進められている。また、計測・制御と自動化技術に関しては、⑥工作物と砥石の自動交換、⑦加工環境・加工状態の計測・監視とこれに基づく適応制御、⑧ピッチ誤差、力・熱変位、多軸運動誤差などの自動補正などが試みられており、最終的には、⑨意思決定を含めた研削の知能化が追究されよう。

また、研削砥石とその使用技術に関しては、⑩微細多結晶砥粒の開発、⑪新しい難削材に対応した砥材の開発、⑫結合材の砥粒保持力向上と高靱性化、⑬超高速回転対応、⑭切れ刃を配列した砥石の開発、⑮ ELID (Electrolytic In-process Dressing) 技術の適用拡大、⑯総形整形のさらなる高精度化などがある。

研削液とその供給法に関しては、⑰環境にやさしい油剤の開発、⑱ MQL (Minimum Quantity Lubrication)、⑲超高压注液などが、また加工技術に関しては、⑳極微細加工、㉑超精密曲面加工、㉒難削材・複合材加工の高能率化などがある。さらに、㉓他の加工エネルギーを複合(援用)した研削技術の開発・実用化などが行われている。

本稿では上記に関わるいくつかのトピックス、すなわち高能率研削の主要な方法論と、超精密研削技術(砥石回転とテーブル送りの超精密化、ELID 研削、超砥粒配列砥石)について概説する。

2. 高能率研削

単位時間あたりの工作物除去体積は、除去深さ t と工作物速度 v の積で与えられるから、この両者を大きくすれば加工能率が上がる。しかし、研削盤の剛性には限度があることや、研削熱の影響が無視できないことなどから、 t か v のどちらかを大きくすることが行われている。前者がクリープフィード研削、後者が高速反転研削である。また、砥石周速度を超高速化することによって加工能率の向上を図る、超高速研削も試みられている。

一方、加工能率を上げるには砥石と工作物が実際に接触するまでのエアカット時間やテーブル反転時のオーバーランなどの無駄時間を排除したり、段取り替えに伴う非加工時間を圧縮したりすることもまた重要である。

2.1 クリープフィード研削

クリープフィード研削は、切込み深さを通常の 100～1000 倍と大きく、逆に工作物速度を 1/10～1/100 と小さくして研削する方法である。図 1 に、クリープフィード平面研削盤の一例を示す。クリープフィード研削では、砥石と工作物の接触長さが極端に長くなり、接触面温度も高くなりやすいので、研削液を高圧で供給したり、多孔質の軟らかい砥石を使用したりする必要がある。一

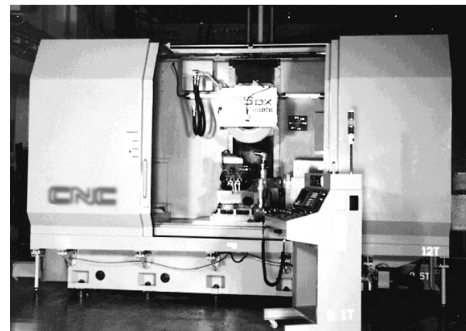


図 1 クリープフィード研削盤の一例

方、砥粒最大切込み深さが非常に小さいので、加工条件によっては研削比の増大が期待できる。

2.2 高速反転研削

研削盤テーブルの往復回数は通常10～100往復/min程度であるが、高速反転研削では500～1000往復/minに達する。テーブルの高速反転は、高加減速リニアモータ、クランク機構などによって実現されている。

高速反転研削には、反転のたびに切込みを入れるハイレシプロ研削と、一定速度で切込みを入れ続けるスピードストローク研削がある。リニアモータを用いたシステムの場合には、テーブル反転時のオーバランをコントロールできることから、寸法の小さい工作物のプランジ研削や金型のパンチ類のかき上げ研削などでその優位性が発揮できる。

図2は、リニアモータを用いたスピードストローク研削によるコンタリング研削結果の一例であり、このような三次元形状も高効率に創成できる。

2.3 超高速研削

超高速で金属を切削すると、すくい面や剪断面の温度が上昇して半溶融状態の薄い金属層が潤滑的な役割を果たすことが期待される。そこで、摩擦抵抗や剪断抵抗の減少を狙った超高速切削実験が多く研究者によって行われている。研削においても、同様の効果を期待した超高速研削が試みられている。

実験的には、空気の音速を超える相対速度で研削した例もあるが、実用化されているのは砥石周速度 $V=80\sim 160\text{m/s}$ 程度の領域である。 V を増加させると、砥粒最大切込み深さが小さくなり、研削抵抗も減少するので、加工能率と研削比の増大が期待できる。

一方、超高速研削を安全に行うには破壊強度の極めて高い砥石が必要である。また、回転数の3乗に比例する風損(周囲の空気との摩擦による損失)があることや、研削点に超高压で注水する必要があるため消費電力が大きくなる。このため、超高速研削が広く用いられるには、さらなる技術開発が求められる。

なお最近では、超高速研削とクリープフィード研削を

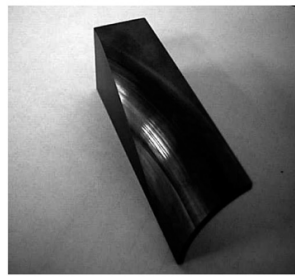


図2 スピードストローク研削によるコンタリング研削の例

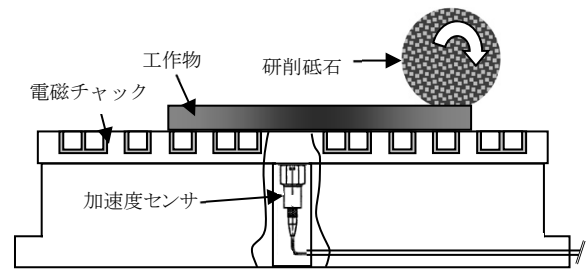


図3 砥石自動接近・テーブル反転適応制御システムの加速度センサ設置状況

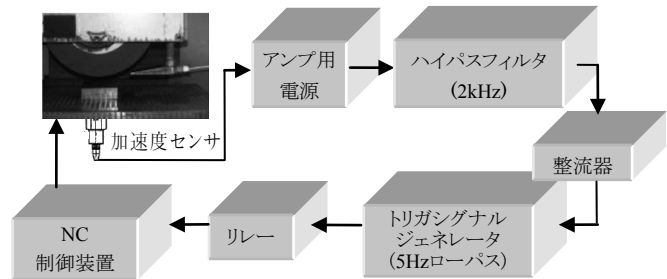


図4 砥石自動接近・テーブル反転制御システムの構成

組み合わせた HEDG (High Efficient Deep Grinding) が実用化されている。この方法によって、耐熱合金製のタービンブレードが高効率に加工できる。

2.4 研削プロセスにおける無駄時間の排除

図3、図4に、筆者らが開発した砥石自動接近・テーブル反転適応制御システムの概要を示す。研削液を供給しながら回転中の砥石を工作物に接近させると、高周波のキャビテーション音が発生し、これがテーブルの内部に設置した加速度センサに検知される。音圧レベルは、砥石の接近に伴って急増するから、トリガレベルを適切な値に設定しておけば、工作物表面にごく近い位置(10～30 μm)で砥石の接近を自動停止できる。

またこのシステムを用いれば、研削中の砥石が工作物と離れるタイミングがわかるから、その瞬間にテーブルの運動方向を反転させれば、工作物形状に沿ったテーブルの反転制御が実現できる。図5は、このシステムを用いたテーブル反転の様子を示したもので、図のL字型工作物の場合、加工時間を約40%削減できる。

さらに、砥石の接近制御機能とテーブルの反転制御機能をともに生かすことで、実研削が始まるまでの無駄時間を大幅に削減できる。とはいえ、砥石の接近制御がうまく機能しないと事故に繋がることから、さらなる信頼性の向上が期待される。

以上の他に、砥石と工作物の交換とこれに付随する

非加工時間を圧縮することもまた重要である。グライディングセンタ化によって解決できている部分もあるが、残された重要な課題と言えよう。

3. 超精密研削

3.1 回転と直線運動および位置決め超精密化

運動転写を基本とする工作機械の回転軸には、数十 μm の流体膜だけで軸を安定的に支持でき、かつ減衰性に優れた油静圧軸受が採用される例が多く、最良のものでnmオーダの回転精度が得られる。一方、砥石と工作物の相対位置を直線的に移動させる直動案内には、油静圧案内あるいは非常に高精度なV-V転がり案内(図6)が用いられ、サブミクロンの運動精度が得られている。

さらに、案内面の近傍に超精密ナリアスケールなどを配置してフィードバック制御することで、位置決め精度とその再現性を高めている。しかし、研削盤の内部発熱、研削熱、研削抵抗などのために加工中における研削点の位置は変動しやすく、その位置をサブミクロン単位でコントロールすることは不可能に近い。

そこで、加工途中に工作物の形状・寸法を高精度に測定して補正加工を施すことが行われる。このプロセスを機上で行えば、工作物のつかみ直しに起因する誤差が防げるから、加工面形状の機上測定装置が種々考案されている。図7は、微小非球面形状の機上測定装置の一例である。図中の計測プローブはエアベアリングで保持され、その変位はレーザーセンサで計測される。

3.2 微粒砥石によるELID鏡面研削

仕上げ面粗さを向上させるには、砥粒の微細化が手っ取り早く、かつ有効である。そのため、多孔質の軟質

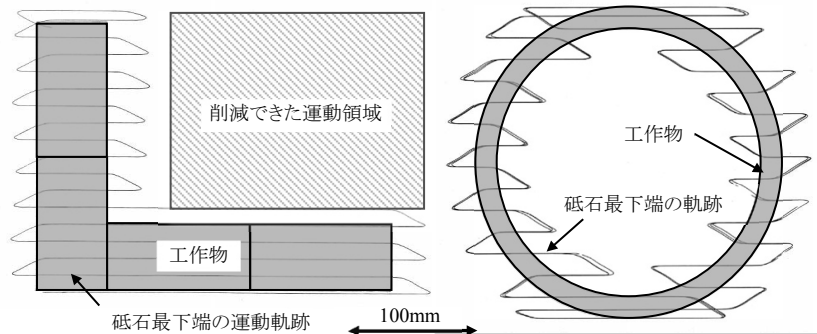


図5 各種形状の工作物に対する砥石最下端の運動軌跡



図6 超精密 V-V 転がり案内 (田中)

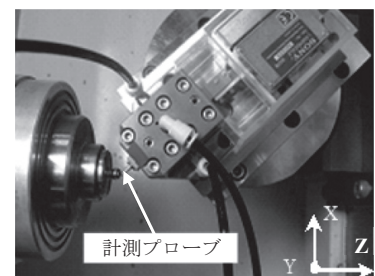


図7 非球面形状の機上測定装置の一例(鈴木)

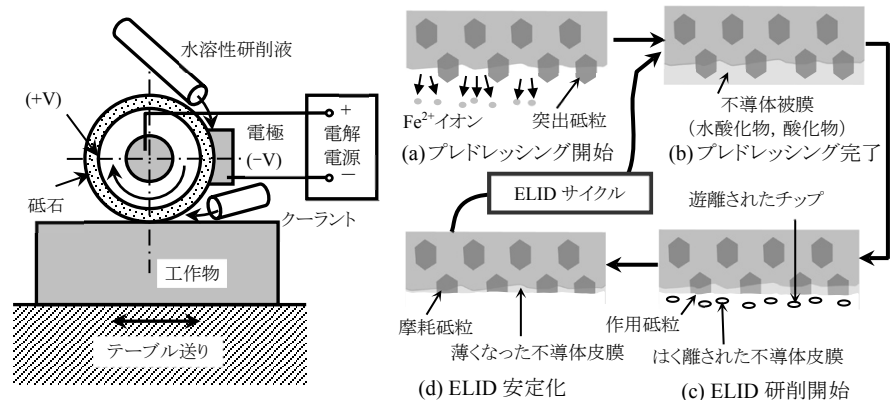


図8 ELID研削の概要(大森ら)

微粒砥石が鏡面仕上に多用されている。しかし、目詰まりが生じやすく、砥石の目立て間寿命や加工能率などの点で課題がある。

そこで大森らは、図8に示すELID研削法を開発・実用化している。この方法では、結合剤に铸铁などを用いた超微粒ホイールを陽極とし、ホイールの表面に対向する陰極を電極間隙が0.1~0.3mmになるように設置して、弱導電性の研削液を供給する。研削に先立ち、両極に直流パルス電圧を印加して、砥石表面の結合剤だけを電解除去するプレドレッシングを行う[図中の(a)]. 結合剤の表面には電解に伴う不導体被膜が生成

されるため、次第に電解速度が低下し、プレドレッシングは終了する(b)。この電解を加工中にも行う(d)ことで、目詰まりを抑えつつ研削を継続できる。この方法によって、SiC、WCなどの硬脆材料を高能率に鏡面加工できる。さらにこの方式を、メタルボンド以外の砥石にも適用するための検討が続けられている。

一方、電子デバイス基板の加工においては金属イオンの汚染を嫌うことが多いため、電解作用に頼らなくても超精密加工が能率的かつ連続して行える多孔質ビトリファイドボンドの微粒ダイヤモンドホイールを開発した例(岡西)がある。しかしいずれの方法でも、機械的な除去作用によって表面を創成している限り、無欠陥な表面を得ることは不可能である。このため、この技術をCMP(Chemical Mechanical Polishing)の代わりに用いることはできない。

3.3 砥粒配列砥石とトランケーション

図9に、筆者らが試作したダイヤモンド砥粒配列砥石の概要を示す。この例では、粒度F60のダイヤモンド砥粒を平均砥粒間隔が0.7mmになるように台金の外周に配列している。砥粒の配列方向は切削方向に対して23.2°傾けているので、連続切れ刃間隔は5.35mmになる。また、任意の砥粒の切削ライン(たとえば図のa, bを結ぶ線)に隣接する切れ刃の切削ラインとの間隔は92μmになる。したがって、砥石表面を極精密ツルーイング(研磨)して切れ刃逃げ面の直径が92μm以上になるように摩滅させれば、工作物の全面がいずれかの切れ刃の平坦面によって切削され、鏡面が得られる。

一方、平面研削や平フライス加工による仕上面の最大高さ粗さ R_z は、次式で与えられる。

$$R_z \propto \left\{ \frac{v}{V} \sqrt{\frac{1}{D}} \right\}^m \quad (1)$$

ここで、 v はテーブル速度、 V は砥石周速度、 D は砥石直径である。上式の指数値 m は、通常の研削砥石では0.4~0.5であるのに対し、この砥石では1.0であったことから、砥粒配列砥石は粗さの操作性に優れていると言える。図10は、この砥石でアルミニウム合金(A5052)を研削した結果を示したもので、実質的にワンパスで0.08μmRzの鏡面が得られている。

一般の超砥粒ホイールの場合にも、切れ刃を高精度に研磨(トランケーション)することによって鏡面仕上げすることができる(田牧)。しかしいずれの場合も、切れ刃先端の研磨速度や使用時の摩耗速度は、結晶方位に

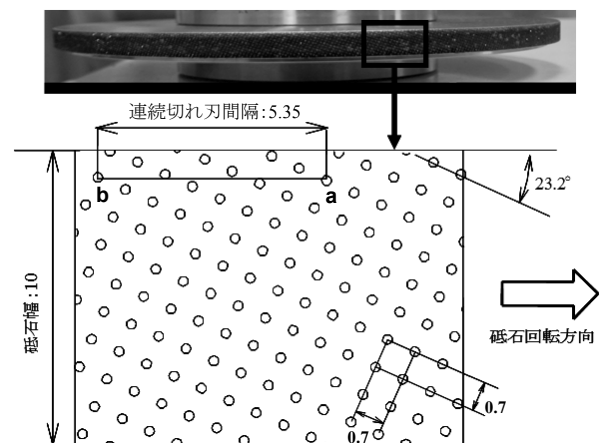


図9 ダイヤモンド砥粒配列砥石(D200, 粒度F60)の外観と砥粒の配列状態

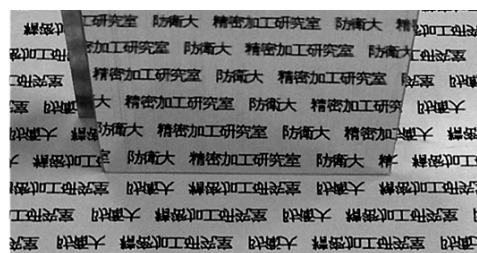


図10 アルミニウム合金 A5052 の研削仕上面 (0.08μmRz)

よって大きく異なるから、切れ刃高さにはばらつきがあるため、光学デバイスとしての使用に耐えるような鏡面を創成するのは難しい。

一方、CVD(Chemical Vapor Deposition)プロセスを応用してごく微細な切れ刃を配列した微小研磨ブロックを創る試みや、単結晶あるいは焼結ダイヤモンド製の微小ホイールの外周にレーザ加工を施して切れ刃を整然と創成する試み(鈴木)などがある、これらが砥石と呼べるのか疑問があるが、超精密・微細加工を行うための新しい取り組みであることに変わりはない。

4. おわりに

研削加工では、仕上面の品質と加工能率が砥石の性能に依存する割合が大きい。幸い、2016年5月号に研削砥石に関する特集が組まれる予定なので、参考にさせていただきたい。

今回は、本稿で取り上げることができなかった、曲面と微細形状の超精密加工について紹介するとともに、各種固定砥粒加工のトピックスと複合(援用)研削について述べ、本レクチャーを閉じることにしたい。