動力監視による内面研削状態の診断*

和久田 学^{*1}, 稲崎 一郎^{*2}

Diagnosis of Internal Grinding Process by Power Monitoring

Manabu WAKUDA and Ichiro INASAKI

It is difficult to perform the grinding operation in an optimum state because the surface condition of the grinding wheel changes considerably with the progressing grinding time. Therefore, one of the most important problems in grinding operations is to determine the wheel tool life reasonably. Grinding with a worn wheel often causes the decrease of the workpiece dimensional accuracy and, consequently, it results in the occurrence of such troubles as grinding burn. In this study, the in-process monitoring method using the power sensor is proposed to detect some malfunctions due to the tool wear in the internal grinding process. Monitoring of the grinding power, the sensor for which can be easily installed into a grinding machine, must be efficient in order to evaluate the sharpness of the grain cutting edges.

Key Words: Grinding, Internal Grinding, Tool Life, Sensor, Grinding Power

1. 緒 言

研削プロセスは、加工条件ばかりでなくドレッシング条件や砥石の選択など数多くの因子の影響を受ける。さらに、砥石作業面の性状は加工時間の経過に伴って著しく変化する。このため、要求される加工精度および能率を持続して達成することが非常に困難なのが実状である。なかでも内面研削加工は、

(1) 加工内径よりも小さい砥石を用いるために砥石軸系の剛性が低い、

(2) 砥石径が小さいために摩耗の進行が速い、などの特異性を持つため、ほかの研削に比べてトラブルが発生しやすい作業とされている⁽¹⁾。

研削加工におけるトラブルは、ドレッシング直後には見られなかったものが加工継続後に発生するケースが多い。したがって、的確な砥石寿命の判定は最も重要な課題の一つと考えられている。しかしながら今までのところ、まだ十分に信頼性の高い砥石寿命監視技術は確立されておらず、ドレッシングの時期は累積加

工時間や加工物個数などをもとに、より控えめに決定されている。すなわち、多くの切刃はその寿命を迎える前にドレッシングが実行されているのが現状である。過剰なドレッシングは、加工能率の低下につながるばかりでなく、砥石の消耗を早めることにもなる。特に、CBNのような高価な超砥粒砥石の場合には、ドレッシング回数が加工費用に与える影響はきわめて大きい。このため、砥石寿命時期を的確に判定する自動監視技術の確立が期待されている。

加工状態のインプロセス監視に使用されるセンサが具備すべき条件としては、構成が単純で保守が容易であること、振動や熱などの外乱の影響を受けにくいこと、加工プロセスに影響を及ぼしたり作業の邪魔になったりしないこと、安価であること、などが挙げられる⁽²⁾。本研究では、これらの条件を満足する手段の一つとして研削動力を取り上げ、これより得られる情報をを用いた内面研削状態の診断方法を提案する。

使 用 記 号

D : 立上り時間 s

F_N : 研削抵抗の法線方向成分 N

K : 機械系の静剛性 N/m

P : 研削動力 kW

* 平成2年9月24日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年4月10日。

*¹ 学生員、慶應義塾大学大学院 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

*² 正員、慶應義塾大学理工学部。

- R : 砥石の実切込み量 mm
 T : 研削時定数 s
 t_d : 無駄時間 s
 v_a : 砥石の実切込み速度 mm/min
 v_f : 砥石の設定切込み速度 mm/min
 v_s : 砥石周速度 m/s
 v_w : 工作物周速度 m/s
 Y : 砥石の設定切込み量 mm
 α, β, γ : 定数
 δ : 砥石軸の弾性変形量 mm

2. 実験装置

研削プロセス監視の実験は、砥石軸動力 2.2 kW の CNC 内面研削盤（岡本工作機械製 IGM-2 M）で行った。研削砥石は直径 30 mm のアルミナ砥石を使用し、工作物は S 45 C（内径 32 mm）を用いた。加工中に砥石軸駆動用モータで消費される動力をパワーモニタによって検出し、A/D 変換した後マイクロコンピュータ（TEAC 製 HP 9000）で解析を行った。一方、加工中の工作物の半径変化を計測するために接触式のインプロセス測定器を利用し、工作物内径のデータが研削動力の信号と同時にコンピュータに送られるようにした。なお、これらのデータは 0.05 s ごとに順次サンプルされるように設定しているが、これらのデータをサンプルする際の両者の時間差は約 7.8 μ s であり、この影響は無視できる。また、動力および工作物内径の信号はそれぞれ、必要に応じて微分回路を通した後にコンピュータに送るようにした。

3. 研削時定数と無駄時間

図 1 は、粗研削とスパークアウト研削とから構成される、最も簡単な内面プランジ研削サイクルにおける砥石台の移動と加工物の内径変化の様子を示したものである。研削加工では、工作物に対して砥石を切込ん

図 1 内面プランジ研削における寸法生成曲線

だときに切込んだ量だけ加工寸法が変化するわけではなく、砥石軸の弾性変形の影響による切残し量が生じる。この切残しを解消するために、砥石の送りを停止して砥石軸の弾性変形の回復によって目標の寸法に仕上げるスパークアウト研削を行うのが普通である。特に内面研削ではほかの研削に比べて砥石軸系の剛性が低いため、この弾性変形の影響を無視することはできない。

以下で、プランジ研削過程が一次遅れのモデルで近似できることを示し、研削時定数を誘導する⁽³⁾。

まず、研削抵抗の法線成分 F_N が、砥石の実切込み速度 v_a に比例すると仮定すると、

$$F_N = \alpha v_a \cdots \cdots \cdots (1)$$

なる研削プロセスのモデルが構成される。構造系の静剛性を K とすると研削抵抗によって生じる弾性変形量 δ は

$$\delta = F_N / K = \alpha v_a / K \cdots \cdots \cdots (2)$$

となる。砥石の設定切込み量 Y と実切込み量 R との間には

$$Y = \delta + R \cdots \cdots \cdots (3)$$

なる関係が存在する。ただし、この間の砥石摩耗は無視している。式(2)を式(3)に代入して両辺を時間 t で微分すると、

$$v_f = T dv_a / dt + v_a \cdots \cdots \cdots (4)$$

ただし、

$$T = \alpha / K \cdots \cdots \cdots (5)$$

となる。ここで、 v_f は砥石の設定切込み速度である。

式(4)は、研削プロセスが一次遅れモデルで表現できることを示しており、式(5)の T は研削プロセスの時定数とみなすことができる。この研削時定数は研削プロセスの応答性の良さを示している。つまり、砥石の切れ味が良いほど小さな値をとり、また機械系の静剛性が增大すると減少する。したがって、研削プロセスの総合的な切れ味評価基準として有用なパラメータであると考えられる。

ところが実際の加工においては、研削抵抗と実切込み速度とが必ずしも線形の関係を持つわけではない。さらに、工作物内径変化のインプロセス測定データを微分して得られた実切込み速度を横軸に、研削動力を縦軸にとり、内面プランジ研削 1 サイクル中の両者の関係を調べたものが図 2 であるが、これより砥石と工作物が接触した後も実切込み速度が変化しない時間、つまり工作物半径が変化しない時間（無駄時間）が存在することがわかる⁽⁴⁾。これは、研削初期における動力と工作物半径の変化を同時に記録した図 3 を見るとより明確になる。このような無駄時間が存在する主な

理由は、砥石-工作物間の弾性変形の影響である。無駄時間内における動力は砥石と工作物の摩擦作用に消費されるだけであり、その間の挙動は次式で与えられる。

$$P = \beta t^n \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 β は比例定数、 t は時間、 n は1以上の指数である。これは、砥石と工作物の間の接触剛性がハードスプリング形の非線形特性を持ち、大きな押付け力が生じる条件の下では接触剛性がより硬く作用するためと考えられる⁽⁵⁾。

一方、砥石の切れ味は、ドレッシングが行われた後、研削時間の経過に伴って低下していき、工作物への砥粒切削の貫入は次第に困難になる。これは接触弾性変形量の増大につながり、図3(b)に示すように無駄時間も長くなる。このように、無駄時間は研削時定数と同様に砥石作業面の状態に対応して変化するパラメータであり、砥石の切れ味を評価する際に役立つ。

プランジ研削1サイクル中の典型的な動力パターン

図2 実切込み速度と研削動力の関係

(a) ドレッシング直後

(b) 研削継続後 (加工時間 300 s)

図3 砥石と工作物の接触初期における動力と工作物半径の変化

は図4(a)のようになるが、この図だけから無駄時間を判断することは困難である。しかし、図3に示した方法では工作物半径測定器を各研削ごとに設定する操作が必要となるため、必ずしも簡便な方法とは言えない。そこでここでは、動力の信号を微分して、式(6)の指数関数で表される挙動を示す部分と、これに続く一次遅れモデルによる近似が可能な部分とに分けて考える[図4(b)]。このとき、砥石と工作物の接触が開始してから動力の微分値が極大点に至るまでの時間を立上り時間 D とし、それ以降の部分に対して指数回帰分析を行うことによって時定数 T を求めた。ここで提案するパラメータ D は、動力パターンの変曲点に対応しており、上述の無駄時間との間により相関がある(図5)。このため、砥石の切れ味を評価するのに適したパラメータであると考えられる。

こうして研削動力パターンから二つのパラメータを計測することができた。特に立上り時間 D は砥石と工作物の接触初期に算出できるため、定常状態に至る前に加工が終了するような1サイクル時間の短い加工においては、より有効なパラメータであると言える。

4. 砥石寿命の判定

研削時間の経過によって砥粒切削の摩滅的摩耗が進行すると、砥石作業面の性状はドレッシング直後のそれとは変化し、やがて望ましい加工結果を得ることができなくなる。摩耗した砥石で研削を続行すると切残し量が多くなるためにスパークアウト研削の時間を長く設定せざるを得なくなったり、研削点に加わる負荷が大きくなるために加工面性状が劣化したりする。

図6は、累積研削量の増加に伴う研削時定数 T 、立

上り時間 D 、および粗研削終了時の切残し量の変化を示したものである。各パラメータはそれぞれドレッシング直後の値との比として表されている。研削作業を継続し砥粒切刃の摩耗が進行すると、砥石の切れ味が低下するために、切残し量は次第に増大する。この傾向は研削時定数や立上り時間の変化にも表れており、これらのパラメータが砥石の切れ味を評価する上で有効であることがわかる。また、CBN 砥石を用いて同様の実験を行った結果を図 7 に示す。この場合には CBN 砥石の優れた性能を反映し、どちらのパラメータもほとんど変化せずに長時間にわたって安定した加工状態が保たれていることがわかる。

図 8 は立上り時間と粗研削終了時における切残し量の関係を示したものである。両者の間には比較的よい相関があるため、立上り時間を監視することが、研削時定数の監視と同様に、砥石寿命を判定する上で有効な方法であると言える。

一方、砥石の切れ味が低下したために研削焼けが発生すると、研削動力はその時点で突然急増することが確認された(図 9)。このため研削焼けの発生は正常研削時の動力パターンと比較することによって検知することが可能である。このように研削動力の監視は研削焼けの発生を検出する上でも有効である。

(a) 研削動力

(b) 動力の微分値

図 4 立上り時間 D と研削時定数 T の測定

5. 実用性に対する検討

内面研削においては、仕上面粗さの向上などを目的として砥石を往復運動させながら切込みを与えるオシ

図 5 無駄時間 t_d と立上り時間 D の関係

図 6 研削時間の経過に伴う研削パラメータの変化(1)

図 7 研削時間の経過に伴う研削パラメータの変化(2)

レーション研削方式がとられることも多い。図 10(a) は、オシレーション研削を行った際の研削動力パターンの例であるが、このときの研削動力は砥石台の往復運動に対応して大きな振幅で変動する。本研究では、この信号に対してフーリエ変換を行い、オシレーションの周期に相当する周波数成分を取り除いた後、逆フーリエ変換によって時系列データに戻すことで図 10(b)を得た。こうしてオシレーションの影響を除去することにより、前述の考察をオシレーション研削の場合にも適用することが可能となる。実際にこの手法で得られた動力パターンに対して、カーブフィットによって近似的に求めた研削時定数は、研削時間の経過に伴って次第に増大していくことが確認された(図

11)。

ここまでの考察は、工作物取付け時の偏心の影響を考慮していない。しかし、実際の研削作業においては、工作物取付け時に少なからず偏心が存在し、砥石と工作物の回転軸間には変動が生ずる。このため、研削を開始してからこのようなずれがなくなるまでの間、研削動力は工作物回転数に対応した周期で振動する。しかし、時定数などのパラメータは両者の軸心間のずれの大きさの影響を受けてしまうため、これまでに述べ

図 8 立上り時間と切残し量の関係

図 9 研削焼け発生時の動力パターン

(a) 処理前

(b) 処理後

図 10 オシレーション研削における動力パターン

図 11 研削時間の経過に伴う研削時定数の変化 (オシレーション研削)

図 12 研削時間の経過に伴うスパークアウト時定数の変化

てきた方法を適用しても砥石の切れ味を評価することはできない。そこで本研究では、式(4)がスパークアウト研削に対しても適用可能であることに着目し、スパークアウト研削の部分における研削時定数を求めることを試みた。図 12 は、スパークアウト研削の部分に対してカーブフィットをして得た時定数の変化を示したものである。この場合にも、砥石切れ味劣化の進行にしたがって次第に時定数が増加していくことがわかる。

6. 結 論

内面研削において、動力パターンより得られる研削時定数と無駄時間が砥石の切れ味評価基準として有効なパラメータであることを示した。特に本研究で提案した砥石と工作物の接触開始時における無駄時間、あるいはこれに対応した立上り時間の監視は、定常状態に至る前にサイクルが終了してしまうような短い加工サイクルにおける砥石寿命の判断に有用である。また、フーリエ変換の応用や、スパークアウト研削時定数を求めることによって、オシレーション研削や工作物に偏心が存在するような実際の研削作業においても砥石寿命の判定が可能であることを確認した。また、研削作業の継続に伴って生じる研削焼けが動力の急増から検知できることを示した。

最後に、本研究の遂行にあたり多大なる援助をたまわった(株)岡本工作機械製作所の諸氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 山本・ほか 2 名, ツールエンジニア, 30-4 (1989), 92.
- (2) 稲崎, 精密機械, 49-3 (1983), 320.
- (3) 鄭・稲崎, 精密機械, 50-6 (1984), 981.
- (4) 岡村・中島, 精密機械, 40-10 (1974), 886.
- (5) 清水・ほか 2 名, 機論, 42-360, C (1976), 2607.