センタレス研削作業における段取り自動化への取り組み*

Automatization of Changeover for Centerless Thrufeed Grinding

立花 亨** 小林 敏***
Toru TACHIBANA and Satoshi KOBAYASHI

Key words centerless grinding, thrufeed grinding, automatic changeover, tool contact control

1. はじめに

センタレス研削は高精度・高効率研削加工に適した加工方法として知られており、特に円柱状および円筒状ワーク外周面の研削加工に対しては、スルフィード研削方式が広く用いられている。

しかしながら、この研削方式における段取り作業は、経験と熟練を要する作業が必要であり、ワークの仕上り精度は機械の性能と同様、またはそれ以上に作業者の技能に依存しているともいわれている。このことは、熟練作業者が減少する生産部門において、ワークの安定した品質と生産量を確保する上でのボトルネックとなる要素ともいえる。

ワークのセンター穴で支持する円筒研削とは異なり、センタレス研削においては、良好な仕上り精度を確保するため、工具の位置、ワーク回転速度、切込速度など、最適な研削条件を探し出すまで数回、調整作業を繰り返すことがある。しかし、一度段取りが終了すれば、連続的にワークを砥石間に供給するだけで高精度な研削加工を安定して行うことができ、その加工効率はセンター支持の円筒研削をはるかにしのぐ。製品の多様化、ライフサイクルの短縮化に伴い、多くの生産ラインが多品種少量生産方式に移行し、さらにコスト削減の要求が高まる昨今、このセンタレス研削の段取り作業の効率化、さらに自動化への取り組みは、それら課題の解決に有効な手段であると考ええる。

2. スルフィード研削方式の概要

図1にセンタレススルフィード研削方式の概要を示す。

*原稿受付 平成21年5月7日

**正会員 ミクロン精密株式会社 (山形県山形市蔵王上野 578-2)

***ミクロン精密株式会社 (山形県山形市蔵王上野 578-2)

立花 亨

東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了、現在ミクロン精密株式会社技術部開発課参与。

小林 敏

山形大学理学部数学科卒業、現在ミクロン精密株式会社技術部テクニカルサポート課課長。

ワークは傾斜面をもったブレード、調整砥石、そして研削砥石の3つの工具に接触した状態で研削される。ワークの支持位置は一般的に研削砥石と調整砥石の軸中心を結んだライン（以下、GR センターと呼ぶ）より高い位置に設定され、ワーク中心と GR センターの距離を心高と呼び、仕上りワークの真円度に影響を与える重要な研削条件である（図2参照）。また、調整砥石軸はワーク軸に対し垂直面内に数度傾けることで、調整砥石の回転によりワークへの

図1 センタレススルフィード研削方式の概要

図2 従来のセンタレスグラインダによる段取り換え

回転駆動と軸方向への推力を与えている。このようにワークは、3つの工具に規制された空間を通過しながら研削される。その空間へワークをスムーズに挿入、そして排出する役割を担っているのが案内板であり、その調整が不良であれば仕上りワークの円筒度に直接影響を与える。仕上りワークの円筒度の要求は数 μm 以下というケースは珍しくない。すなわち、ワークをわずか数 μm も傾けずに、調整砥石から排出するには、同様のオーダーで案内板を調整する必要がある。

さらに、砥石の出口側付近、すなわち研削が終了する領域では、研削砥石と調整砥石の間隔を平行となるように配置し、切込みをせず、仕上りワークの表面粗さ精度を確保するための、いわゆるスパークアウト領域を設ける必要がある。これは調整砥石上のワークパスラインに応じて、調整砥石を水平面内に旋回調整（機種によっては研削砥石を水平旋回）する作業であり、いわゆるアタリ（当り）出しとも呼ばれる。仕上りワークの表面を観察し、さらに研削中のスパーク量を確認し、調整砥石が研削砥石に対して適切な配置となるよう調整する。このアタリ出し作業は、仕上り精度はもとより、研削砥石の寿命にも影響を与えるため、この作業も案内板調整と同様、経験や熟練技能を要する。スルフィード研削の段取り作業において、案内板調整、アタリ出しの2つの作業をいかに素早く、そして正確に行うかが、生産効率、または品質安定の重要な要素となる。

3. スルフィード自動段取り技術

センタレススルフィード研削において異径ワークへの段取り換えは、基本的には案内板調整、アタリ出しと呼ばれる調整砥石の水平旋回調整、そしてワーク径の変化が大きい場合はブレードの高さ調整が必要である。これらの作業を自動化するには、段取り換え作業時、作業者が行っている工具の位置調整と同様のことを行うために、ワーク径変化に応じた各工具の移動量を求めるアルゴリズムを構成し、NC制御する方法と、他方、ワーク径が変わっても調整が不要となるように機械構造を変更する方法の選択となる。当初は前者で検討していたが、最終的に、後者を選択できることが明らかになった。

従来のセンタレスグラインダで異径ワークへの段取り換えを行う場合、図2に示すように研削砥石とブレードの位置を固定した状態で、ワーク径に応じて調整砥石をGRセンターに沿って移動させる。その結果、ワークと工具のすべての接点が移動する。

この3接点のうち、ワークと調整砥石の接点の移動、3次元で表現すると調整砥石上のワークパスラインの移動が、案内板調整作業とアタリ出し作業が必要となる共通の原因となる。実際、仕上りワーク径が0.5mm異なっても案内板調整やアタリ出し作業が必要となる場合がある。もし段取り換え作業の前後において、ワークと調整砥石の接点が移動しなければ、上記2つの調整作業は不要となる。

4. 接点一定の段取り換え

図3に示すように、研削砥石、調整砥石、そしてブレードの3つの工具にワークAを接触させ研削位置を決める。そのときのワークと調整砥石の接点をPとする。

次に3つの工具を移動させず、研削砥石とブレードに接触させたワークBと調整砥石上の点Pに接するワークB'を仮想的に配置する。そこで点Pに仮想的に接しているワークB'をワークBに一致する方向、すなわち直線Ob'-Obに沿って調整砥石を移動させることができれば、原理的に接点一定の段取り換えは可能となる。

さらに、ワークAより小さく、ワークBより大きい任意径のワークCを同様に配置した場合、点Pに接するワークC'の径を変化させたときの中心Oc'の描く軌跡は直線となる。一方、研削砥石とブレードに接触させたワークCの径を変化させたときの中心Ocの軌跡は2次曲線となる。

このOcの軌跡を2次曲線として厳密に扱い、段取り換え制御をするには、複雑な制御プログラムおよび高価な制御装置が必要となる。

しかし、この2次曲線の曲率は、制限された範囲内で段取り精度上無視できる誤差範囲になることが明らかになった。そこでOb-Oa間においてこの曲線を直線で近似した。

これにより、現在設定されているワーク径と次に加工するワーク径の差と調整砥石の移動距離は一次式で表現される。それで求めた移動距離だけ調整砥石を直線Ob'-Obに沿って移動することで図4のように、異なる径のワークA、ワークBの接点A、接点Bは調整砥石上および案内板上で一定の位置となり、自動段取りが可能となった。

厳密には、スルフィード研削の場合、調整砥石は垂直面内に傾けて設定しているため、3次元で考察する必要があるが、その調整砥石の傾き角を3~4°程度に設定しても自動段取りの制御上無視できる誤差で抑えられることが実験的に分かっている。

図3 接点一定の原理

図4 接点一定の段取り換え

図6 接点一定の自動段取り機の構造

図5 ワーク径変化に伴う心高の変化

5. 心高変化の抑制効果

従来のセンタレスグラインダの砥石はGRセンターに沿って移動する構造であるため、砥石が移動してもGRセンターは常に一定である。他方、接点一定の自動段取り用のスライド構造は、GRセンターと交差角を有する調整砥石スライドを移動させることで、GRセンターの高さが変化する。

このことは、ワーク径変化に伴う心高の変化を従来の構造より小さくすることを可能とした。つまり、ワーク径が大きくなることでその中心は高くなるが、直径の変化に伴い調整砥石スライドを後退させることで、GRセンターの位置も高くなり図5に示すように、GRセンターはLbからLaに移動し、ワーク中心とGRセンターからの距離、つまり心高は従来の構造よりも変化が少ない。

例えば、実際に行った例を心高角（図5の γ 参照）の変化で紹介すると、ワーク最小径 $\phi 19$ 、最大径 $\phi 42$ の範囲で自動段取りを行う場合、研削砥石径を $\phi 610$ 、調整砥石を $\phi 330$ として、 $\phi 19$ のワークを心高角 $6^{\circ}30'$ で設定した場合、従来の方法でGRセンターに沿って調整砥石スライドを移動し $\phi 42$ に段取り換えを行うと心高角は約 $9^{\circ}30'$ まで上がる。しかし、自動段取り用に角度を設定した調整砥石スライドの場合は約 $7^{\circ}45'$ で抑えられ、従来と比較してその変化は半分以下となる。通常、センタレス研削におけ

る適切な心高角の範囲は $6\sim 8^{\circ}$ 程度とされることから、従来の構造であれば、ブレードの高さ調整が必要となるところ、このワーク径変化に伴う心高の変化の抑制効果によりブレード調整作業を不要とし、より広いワーク径の範囲で自動段取り制御を可能とする。

6. 接点一定の自動段取り機の構造と設定

従来のセンタレスグラインダでは調整砥石の下部スライドと上部スライドは平行に配置されていたが、接点一定の自動段取り機では、図6に示すように上部および下部スライドの間に角度を与えた構造となる。

この角度が図3の直線Ob'-ObとGRセンターに対する角度に相当する。こうして、段取り換えは調整砥石上部スライドを位置制御により行い、また砥石摩耗による仕上りワークの寸法補正は下部スライドの移動で行う。

さらに、初期設定として自動段取り対象範囲の最大径のワーク、最小径のワークを使って調整砥石上部スライドをセットし、そのときの調整砥石間の距離（図3のOb'-Obに相当）をNC装置に記憶させる。その後、希望するワーク径をNC装置に入力、演算処理し、調整砥石スライドを移動することで自動段取り制御を行う。

希望するワーク径の入力からスライド移動まで、数10秒程度で完了する。

図7に接点一定の自動段取り機の外観を示す。

7. 2 接点一定の段取り換え

スルフィード研削の場合、一般にワーク供給排出装置が研削盤本体の前後に設置されているケースが多い。特に大型のワークであれば、ワーク供給排出装置は床置き式となり、異径ワークへの段取り換えでは、その位置調整が必要であり、相当の時間を要する。またそれら装置調整幅も長くなることから、調整機構も大掛かりとなる。

そこで、図8に示すように調整砥石とワーク、そしてベッド固定のブレードとワークの2接点を変えずに段取り換えをすることで、ワーク供給排出装置の調整作業を簡略化することが可能となった。

図7 接点一定の自動段取り機の外観 MSL-600 III-SP

図8 接点一定の段取り換え

研削砥石スライドを設けることで、砥石径やワーク径が変化してもブレードとワークの接点を一定に保つように制御できる。また、調整砥石スライドは研削砥石スライドに対して角度を与えて移動させ、ワーク径が変化してもワークと調整砥石の接点を一定に保つように制御できる。

これにより、ブレード調整、または交換作業なしでこれまで以上に広範囲の自動段取りが可能となり、さらにワーク供給装置の調整も簡素化が図られる。

8. 接点制御の段取り換え

2 接点一定の段取り換え自動化仕様のさらなる拡大を図り、図9に示すようにワークに接触する調整砥石、研削砥石、そしてブレードの3つの工具すべてをNC装置にて位置制御できる機械を開発することにした。

ブレードを保持しているベースをワークレストと呼ぶが、可動式のワークレストを1998年に開発、2008年には、さらに大型ワークに対応すべく剛性を高め、位置決め精度、耐久性を向上させたモデルを開発した。NC制御による可動式ブレード（ワークレスト）を用いることで、これまでのモデルでできなかった心高、または心高角の自動調整が可能となり、ブレードの剛性が十分であれば、 $\phi 10 \sim \phi 240$ のワーク直径の範囲で自動段取りが可能となった。

さらに、これまでの1 接点一定、2 接点一定の段取り制御はもとより、調整砥石スライドと研削砥石スライドに角

図9 接点制御の段取り換えの例

図10 接点制御の自動段取り機の外観 MFC-600 VI-15D-GS

度を設ければ、3 接点一定の段取り換えも可能となる。

また、研削砥石用、調整砥石用ともに耐摩耗の高いダイヤモンドロータリドレッサを使用し、そのドレッサの切込軸の座標により、各砥石の正確な径を管理することで、これまでの2つのマスターワークを使った初期設定作業も不要となり、従来よりも少ない作業で、さまざまな条件での自動段取り制御ができるようになった。

例えば、ワークと調整砥石の接点を一定に保ち、さらにワーク中心の移動をブレード（ワークレスト）の移動方向と同一にするという条件で段取り制御を行い、供給装置の自動段取りも可能となった（図9参照）。

図10に接点制御の自動段取り機の外観を示す。

9. おわりに

これまでセンタレススルフィード研削方式での段取り換えの自動化の取り組みを時系列で紹介してきた。1994年以来、開発した3機種の自動段取り機は、多品種少量生産の生産ラインで稼働している。

今後は接点制御の展開により、センタレスインフィード研削方式へ適用し、心高角一定の段取り換え、さらにワーク中心位置を管理することによりローディング装置の段取り換えも自動化が可能となる。さらにセンシング技術を用いた力学的制御により、加工条件の最適化を図った自動段取り制御の可能性も見いだされている。

今後ともセンタレス研削作業における省力化を図り、熟練技能者の技術に迫る自動化に取り組みたい。