

高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25 のご紹介

Introduction of high speed CNC eccentric pin grinding machine GPEL-30B.25

永尾公壮*, 村上和史*, 松本 耕*, 大田 純*, 小谷拓也*

Koso NAGAO, Kazufumi MURAKAMI, Ko MATSUMOTO, Jun OHTA and Takuya KODANI

Key words : non-round grinder, eccentric pin, hydrostatic bearing, linear motor, built in motor, learning control

1. 緒言

空調機器や減速機等に用いられる主要な精密部品の一つに偏心ピンがある。この偏心ピンを加工する研削盤には、高精度・高能率研削による生産性向上に加えて、偏心ピン形状の多様化に対応した汎用性向上の要望がますます高まっている。これらの要望に応えるべく、多様な形状の偏心ピンを高精度・高能率に研削するだけでなく、ロボットやローダ等の搬入・搬出装置にも柔軟に対応可能な高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25 (図 1)を開発した。

本稿では、砥粒加工学会技術賞を受賞した高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25 を紹介する。



図 1 高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25

2. 高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25 の概要

主として円筒形工作物の外面を研削する CNC 円筒研削盤は、主軸台、心押台、といし台、テーブル、ベッドなどからなり、標準的な NC 軸は、といし台送り(X 軸)とテーブル送り(Z 軸)の 2 軸である。これに主軸回転(C 軸)を加えて X 軸と同期制御すれば、偏心ピンをはじめカムや多角形などの非真円研削が可能になる。高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25 では、主軸回転(C 軸)を高速度化するとともに、といし台送り(X 軸)も高速度・高加速度化することで偏心ピンの高エネルギー研削を実現している。

表 1 に、高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25 の主な仕様を示す。テーブル上の振りは $\phi 300\text{mm}$ 、センタ間距離

表 1 GPEL-30B.25 の主な仕様

テーブル上の振り	$\phi 300\text{mm}$
センタ間距離	250 mm
研削最大外径	$\phi 150\text{mm}$
最大偏心量	12 mm
主軸回転速度	15~400 min^{-1} (max 600 min^{-1})
ホイールの大きさ	$\phi 300 \times 25 \times \phi 127\text{mm}$
ホイール周速度	100 m/sec
機械本体の大きさ (幅×奥行き×高さ)	2,200 × 1,900 × 1,600 mm

250mm で、外径 $\phi 300\text{mm}$ の cBN ホイールが液冷式ビルトインモータにより周速度 100 m/sec で回転駆動される。主軸回転(C 軸)の高速度化と、といし台送り(X 軸)の高速度・高加速度化により、偏心量 12mm の偏心ピンを主軸回転速度 400 min^{-1} で研削可能である。なお、主軸の最高回転速度は 600 min^{-1} としている。本機は、テーブルがといし幅方向に移動するテーブルトラバース方式を採用しており、といし台の前後進による反力をベッドが直接受ける構造のため、力線のループ剛性が高い。さらに、CAE 構造解析によりベッドが高剛性化されていることも相まって、高加速度運動中でも X 軸の位置決め精度は良好である。

3. 偏心ピンの研削に必要な機械要素技術

偏心ピンを高精度かつ高能率に研削するには機械技術と制御技術の高度化が必要である。機械技術では、といし台送りと主軸回転のフリクションレス・ノーバックラッシュ化が必須で、といし台の低慣性モーメント化と高速反転時の姿勢維持も重要である。これらの性能を実現するため本機に搭載されている機械要素技術について述べる。

3.1 といし台送り(X 軸)の直動案内

偏心ピンの研削では、工作物の回転と同期してといし台が前進と後退を繰り返しながら研削加工が進行する。このとき C 軸と X 軸に偏差が生じると、それが偏心ピンの形状誤差となる。バックラッシュのない円滑なといし台送り(X 軸)精度を得るためには、直動案内面の低摩擦化が必要である。

一方、といし台送り反転時などで X 軸に高加速度が発生すると、といし台の姿勢が崩れ易くなり、形状精度が悪化する要因になる。また、といしのアンバランスやといし軸モータの振動によりといし台が振動すると研削面にビビリが発生する。

* (株)シギヤ精機製作所:〒721-8575 広島県福山市箕島町5378
(学会受付日:2019年12月 日)

といし台の姿勢を維持して制振するのは、直動案内面の剛性と振動減衰性能である。したがって、偏心ピンを高精度に研削するためには、直動案内面の低摩擦化だけでなく、高い剛性も必要になる。このため本機の X 軸案内面には、対向形式の静圧案内が採用されている。図 2 に、対向形式静圧案内の模式図を示す。この静圧案内は完全非接触の油静圧軸受方式で、金属接触がないため摺動抵抗が非常に小さく、バックラッシュのない高精度で円滑な運動を長期間安定して維持することができる。また、移動方向を除く上下、左右方向の振動減衰性能にも優れている。

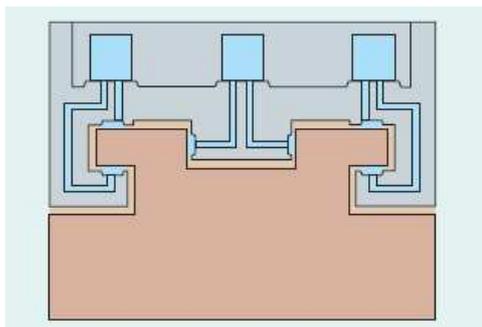


図 2 対向形式静圧案内の模式図

また、本機の静圧案内には、自社開発の自動調整絞りを採用している。この絞りは、負荷の変動に応じてその特性を自動的に調整するため、低いリセス圧力でも高い軸受剛性が得られる。案内面が適正な大きさであれば、といし台の小型化により質量が軽減され、X 軸の高加速度運動が可能になる。さらに、静圧案内の高い軸受剛性により、といし台送りの反転時でもといし台の姿勢が安定的に維持される。

3.2 といし台送り(X 軸)の駆動方式

本機のといし台送り(X 軸)駆動機構はリニアモータ方式である。この方式は、リニアスケールでといし台の位置を測定してフィードバックするフルクローズドループにより制御される。駆動部やスケール取り付け部の高剛性化により共振を低減し、サーボゲインを高く設定して優れた位置決め精度を得ている。また、非接触で駆動源と動作部分の動力伝達系がないため研削時の振動・騒音が小さく、高速でといし台を駆動することができる。本機は、直動案内面にモーメント荷重がかからないように、といし台の重心を駆動している。これも運動中のといし台の姿勢が安定している理由の一つである。

3.3 主軸回転(C 軸)の駆動方式

主軸は同期ベルトインサーボモータで回転駆動される。この駆動方式は、小さな慣性モーメントでねじり剛性の高い主軸回転機構の設計が可能で、加速度を大きくできる。ただし、電機子と回転子の磁氣的吸引力が回転角度に依存して変化するコギングトルクがあるため、正弦波状の補正トルクを電流指令に加えてコギングトルクを小さくし、回転ムラがないように制御している。また、温度調整された冷却液がモータの熱を外部に排出して、ベルトインモータの温度上昇を抑制している。

といし台送り(X 軸)駆動機構のリニアモータ方式にも同様のコギングトルク対策と熱対策が施されている。

4. 偏心ピンの研削に必要な制御技術

偏心ピンの研削で高精度な形状精度を得るには、機械要素技術に加えてデータ処理速度の高速化と NC 制御による位置決め精度の高精度化が必要である。

NC 制御は、指令値に対する偏差をフィードバックして補正するのが一般的である。しかし、非真円研削では、C 軸か X 軸に偏差が発生した時点で既に工作物は加工されているため、常時、偏差のない位置決めをする必要がある。

本機は、位置決め誤差を最小化する高精度学習制御により、主軸回転(C 軸)といし台送り(X 軸)の各軸が駆動される。この制御は通常の偏差によるフィードバック制御に加えて 1 周期(工作物 1 回転)前の偏差を付加することにより周期的な目標入力に対して高精度に追従させ、回転系と直動系のそれぞれの慣性モーメントによる偏差だけでなく、研削抵抗などの外乱による偏差も取り込んで処理する。また、規則性の無い外乱に対して偏差を小さくしてサーボ剛性を向上させるために、速度制御の処理速度を高速化するとともに加速度フィードバック制御と制振制御の最適化を行なっている。なお、本機では C 軸と X 軸の偏差および X 軸の加速度をモニタ画面に表示させ、これらの変動をモニタリングすることが可能である。図 3 にモニタ画面に表示された X 軸加速度の表示例を示す。

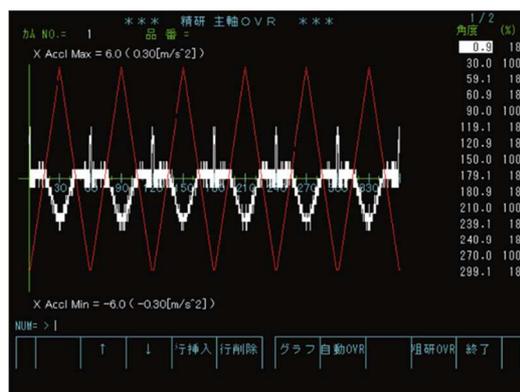


図 3 といし台送り(X 軸)加速度の表示例

本機の切込みモードには粗研、中粗研、精研、スパークアウトの4段階があるが、学習領域は粗研、中粗研、精研・スパークアウトの3領域に分割されていて、領域ごとにC軸とX軸の高精度学習制御が実行される。

各領域における研削開始時のC軸とX軸の位置制御データは、直前に研削した工作物のその領域における最終データである。たとえば、切込みモードが中粗研から精研に切り替わるとき、精研開始時のデータは、中粗研の最終データではなく、直前に研削した工作物のスパークアウトにおける最終データである。したがって、外乱である中粗研と精研の研削抵抗の相違が、高精度学習制御による偏差の収束時間に影響を及ぼすことはない。このため、精研・スパークアウト領域においてC軸とX軸それぞれ偏差が急速に収束して位置決め誤差が最小化され、非真円工作物の研削で良好な形状精度を得ることができる。

5. 本機の特徴とオプション設定

5.1 工作物の支持方式

本機の標準的な工作物の支持方式は、主軸センタと心押軸センタで工作物を支持する両センタ方式であるが、心押台が不要なバイス式チャック方式も準備されている。図4に本機で採用されている工作物の支持方式を示す。

両センタ方式では、コレットチャックで把持された工作物がビルトインモータにより回転駆動される。工作物の把持部とセンタ穴の同軸度が不良の場合には、オプション設定のフローティング式コレットチャックが使用される。これは、把持部に合わせてコレットチャックが自動的に心出しされて両センタで支持された工作物に無理な力がかからないように把持できるため、高精度研削用のツールとして有効である。

バイス式チャック方式では、V型あるいはU型のレストに工作物のジャーナル部を載せ、バイスで押さえて固定する。ジャーナル径に合わせた専用レストを使用し、ジャーナル中心と主軸回転中心を一致させて回転駆動するのが一般的である。ただし、V型レストに限り、異なるジャーナル径でも同じV型レストを使用して段取り替えを不要にすることもできる。ジャーナル径に応じてジャーナル中心と主軸回転中心の偏心量を自動計算し、その偏心量を取り込んで形状データを補正する。

5.2 非真円形状工作物の研削

本機は偏心ピンの研削だけでなく、非真円形状の研削も可能である。モニタ画面内のX-Y座標で任意形状を定義したり、ユーザがCADで描画した形状をDXFデータに変換して入力したりすることが可能である。また、ポリゴン研削対話システムに予め登録されている13種類の基本形状の中から、モニ

タ画面上で任意の形状(図5)を選択して寸法や偏心量を入力するだけで、容易にその形状を創成研削できる。図6に、本機で研削した非真円形状工作物の例を示す。

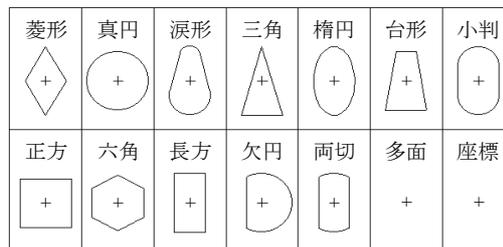


図5 対話システムに登録されている基本形状

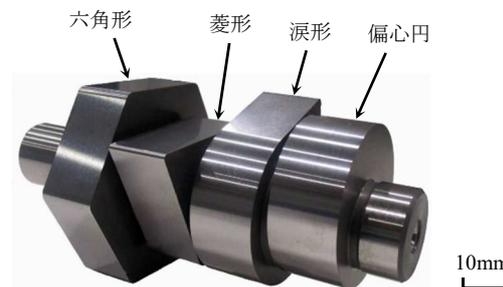


図6 GPEL-30B.25で研削した非真円形状工作物

5.3 メンテナンス性

本機では、保守機器類が機械の右側後方に集中配置されている。これにより油空圧力の調整など、日常的なメンテナンス作業を機械の右側後方1箇所だけで行うことが可能である。また、機械後部に配管・配線専用のスペースを設けて作業性を向上させている。さらに、テーブルと台の間をカバーで仕切って、テーブル上の空間を加工室として完全に機外と分離した。これにより、機械後方へのミストの飛散がなくなり、ミストの付着に起因する周辺機器の不具合発生が抑制される。

5.4 外径直接定寸装置

本機には外径直接定寸装置のオプション設定がある。この外径直接定寸装置は、ジャーナル中心まわりに公転運動する偏心ピンを上下の接触子で挟み、広範囲測定用ヘッドで外径寸法を測定する。測定可能な最大偏心量の仕様は6.25mmと10mmの2種類である。また、この外径直接定寸装置で偏心ピンの位相決めも可能である。

5.5 その他

本機には各種センサで測定されたデータをモニタ画面に表示させるシステムがオプション設定されており、IoTにも対応可能である。このオプションにより、各ユニットや要素に設置した振動、回転速度、温度、液面レベル、流量、圧力などのセンサから得られたデータをモニタ画面で確認し、機器の稼働状態や不具合発生をリアルタイムでモニタリングすることで、予防保全や最適制御の策定が可能になる。

また、ロボットやローダといった搬入・搬出装置の設置スペースや設置方法などを考慮した設計になっているため、自動化の要求にも迅速な対応が可能である。



(a) コレット式両センタ方式



(b) バイス式チャック方式

図4 GPEL-30B.25の工作物支持方式

6. 本機の研削精度

6.1 研削条件

高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25 で、浸炭焼入れされた SCM 材のテストピースを研削した。図 7 にテストピースの概要を示す。研削箇所は、仕上外径 $\phi 40\text{mm}$ 、偏心量 2.5mm 、研削代 0.3mm の偏心ピン部が 3 箇所と、仕上外径 $\phi 25\text{mm}$ 、研削代 0.25mm のジャーナル部が 2 箇所である。右側偏心ピン部を直接定寸研削で加工し、X 軸座標系を設定した後、その他の研削箇所を間接定寸研削で仕上げた。なお、左右の偏心ピン部と中央の偏心ピン部の位相角度は 180° である。工作物の支持は両センタ方式とし、コレットチャックで工作物を把持した。粒度 #230 の cBN ホイールで、周速度は 100m/sec 、工作物回転速度は偏心ピン部が 400min^{-1} 、ジャーナル部が 570min^{-1} である。

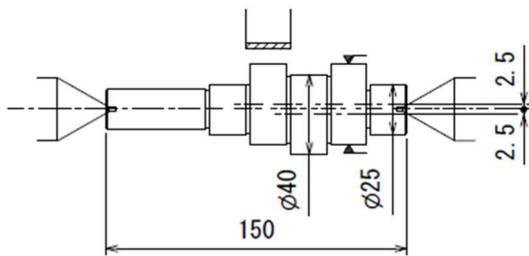


図 7 テストピースの概要

6.2 間接定寸研削部の寸法変化

図 8 に、電源投入後、暖機運転なしのコールドスタートからテストピース 40 本を連続研削したときの偏心ピン部の寸法変化を示す。データは間接定寸研削 1 箇所目となる中央偏心ピン部のものである。サイクルタイムはテストピース 1 本当たり概ね 90s で、間接定寸研削偏心ピン部の研削時間は 1 箇所当たり 15s であった。

研削開始後、6 本目までは $\phi 2\mu\text{m}$ の変化があったが、それ以降は $\phi 1\mu\text{m}$ の変化に収まっている。この傾向は、間接定寸研削 2 箇所目となる左側の偏心ピン部および左右両端のジャーナル部においても同様である。

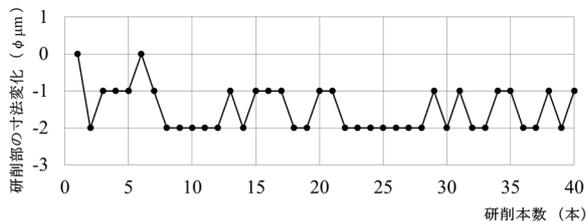


図 8 間接定寸研削による偏心ピン部の寸法変化

6.3 間接定寸研削部の形状精度

図 9 に、偏心ピン部の真円度を示す。これは連続研削 40 本目の工作物における中央偏心ピン部の真円度であり、図中のデータ No. は 34, 35, 36 の順に中央偏心ピン部の右側、真中、左側のデータである。

いずれも真円度は $1\mu\text{m}$ よりも小さく、良好な形状が得られたことが分かる。なお、連続研削 1 本目から 40 本目まで真円

度に大きな違いや変化はなく、 $0.35\mu\text{m} \sim 0.55\mu\text{m}$ の範囲であった。

また、いずれの偏心ピン部も偏心量誤差は $1\mu\text{m}$ 以下、位相角誤差は 0.037° 以下と高精度である。

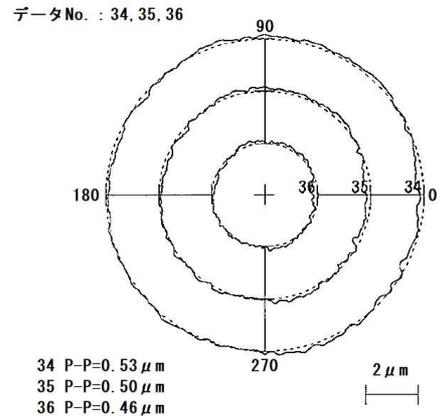


図 9 間接定寸研削による偏心ピン部の真円度

6.4 間接定寸研削部の表面粗さ

図 10 に、連続研削 40 本目の工作物における中央偏心ピン部の粗さ曲線を示す。目立った深い傷は見られず、表面粗さは $0.08\mu\text{m Ra}$ である。なお、連続研削 1 本目における同部分の表面粗さは $0.04\mu\text{m Ra}$ で、連続研削した 40 本全ての工作物表面粗さは $0.1\mu\text{m Ra}$ 未満であった。そして、研削後の工作物表面の性状は研削焼けもなく良好で、非常に高品位な研削加工面が得られた。

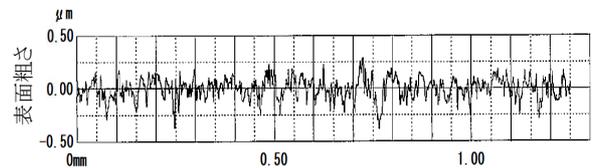


図 10 間接定寸研削による偏心ピン部の粗さ曲線

7. 結言

ホイール周速度と工作物周速度を高速化するとともに、といし台送りも高速度・高加速度化した高速 CNC 偏心ピン研削盤 GPEL-30B.25 の概要と研削精度を紹介した。本機で偏心ピンを試研削し、高能率な研削で良好な研削精度を得ている。

本機は、偏心ピンだけでなく、ポリゴンやカムなどの非真円工作物も高精度・高能率に研削できる。また、といし台の振動、ホイール回転速度、研削液および作動油の温度と量などをモニタリングする機能を有し、IoT にも対応している。さらに、ロボット、機内ローダ、ガントリーローダなどの搬入・搬出装置をオプション設定しているため、量産加工と生産工程の自動化にも対応可能である。

8. 参考文献

- 1) Toyozawa.Y., Maeda.K., Sonoda.N., Applying High-gain Learning Control to Cam and Crankshaft Grinders, FANUC Tech.Rev.,10,1.,13-21(1997)