

## 微小穴明けに関する研究 - 求心作用の穴位置精度への影響 -

豊橋技科大 ○木本 誠二, 野村 光由, 柴田 隆行, 村上 良彦, 堀内 宰, 榎田正美

### Study on micro drilling

#### - Influence of centripetal action on hole position accuracy -

Toyohashi University of Technology Seiji KIMOTO, Mitsuyoshi NOMURA, Takayuki SHIBATA,  
Yoshihiko MURAKAMI, Osamu HORIUCHI and Masami MASUDA

This study aims to attain high accuracy and efficiency for precision micro drilling of small holes measuring under 0.1 millimeters in diameter such as those formed in a fuel injector for an automotive engine. In this study, drilling experiments were designed to investigate the effect of the centripetal action on hole position accuracy. The experimental results obtained are as follows, (1) The model of centripetal action by the tool elastic deformation is proposed. (2) The centripetal action is high at A5052 because a resistance of tool-top transfer is large. (3) The centripetal action is low when radial run-out is small.

### 1. 緒言

近年、環境負荷の低減などを目的として、自動車エンジンの燃料噴射ノズル小径化の要求が多い。また、携帯電話など電子機器端末の回路基板製造においても微小穴明けへの要求が急増している。

それら各種材料に対する加工方法として直径 0.1mm 以下の微小径ドリルが注目されている。しかし、微小径ドリルは工具径が非常に小さいため低剛性であり折損しやすい。また、大径ドリルに比べ微小径ドリルではチャッキングやスピンドルの高速回転による工具の振れが、工具や加工品質に大きく影響を与える。

本研究では、直径 0.1mm の微小径ドリルを用い、工具に任意の振れを与えて穴明けを行い、加工中の切削力評価および穴位置精度の測定から、求心作用<sup>1)</sup>の穴位置精度への影響について検証し、高精度穴明け加工の実現を目的とする。

### 2. 実験装置および実験方法

実験には微細加工用マシニングセンタ(KIRA 製 SuperMill-2m)を使用し、転がり軸受スピンドル(回転数 3,000 ~ 50,000 min<sup>-1</sup>)を用いて微小穴明けを行った。工具の振れの測定には、微細工具測定装置(ユニオンツール製 EDR-D20)を使用した。切削力の測定には、高帯域 3 分力動力計(キスラー製 9251A)を使用し、三分力  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  を測定し、高速データ収集システム(KEYENCE 製 NR600)で記録した。加工穴の位置精度の測定には、非接触三次元測定装置(三鷹光器製 NH-3NT)を使用した。

Table 1 に、微小穴明け加工の実験条件を示す。工具のチャッキングにはコレットチャックを用い、コレットとコレットホルダの間に数~数十 $\mu\text{m}$  厚のシムを挟むことで工具の振れを与えた。

### 3. 実験結果

Fig.1 に、加工開始時の測定例を示す。この図から

- ① 加工開始時から各分力に回転に同期した周期変動が見られ、工具振れの影響が認められる。また
- ②  $F_x$ ,  $F_y$  は、工具 1~1.5 回転で定常振動に達している、ことが分かる。

Table 1 微小穴明け加工実験条件

Tool	Diameter mm	$\phi$ 0.1
	Flute length mm	1.2
Rotational speed min <sup>-1</sup>		24,000
Feed rate mm/min		30
Depth of cut mm		Blind hole, 0.3
Radial run-out $\mu\text{mTIR}$		0(1)~50
Workpiece		A5052, SUS420, Pre-hardened steel(40HRC)

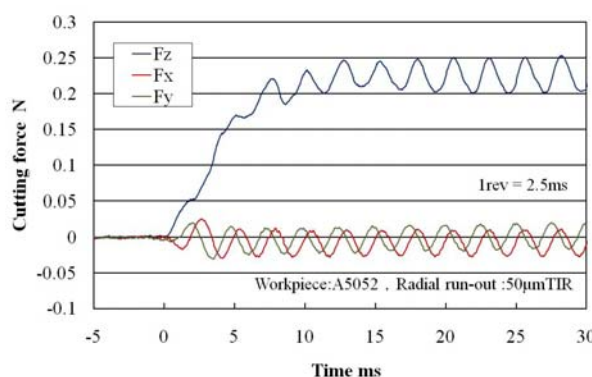


Fig.1 加工開始直後の切削力測定結果

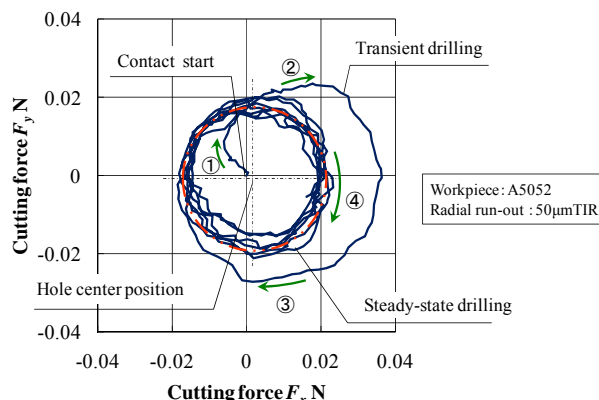


Fig.2 Fig.1 に対応した  $F_x$ - $F_y$  のリサージュ図

Fig.2に、Fig.1における $F_x$ と $F_y$ のリサージュ図を示す。時間経過を丸付き数字と矢印で示しているが、工具刃先が被削材に接触し始めてから1~1.5回転(4ms, 切り込み深さ3 $\mu\text{m}$ )後には、力のベクトルは原点より0.002Nだけ離れた位置を中心に、半径0.02Nの円軌道を描き始める。この間に、刃先位置は振れ半径25 $\mu\text{m}$ の周回軌道から加工穴位置に至る。

この図の縦軸と横軸を工具刃先における曲げ剛性で除した値で表示すれば、工具刃先の弾性変形の軌跡になる。この例では、接触開始後に工具刃先が主軸軸心に対し最大46 $\mu\text{m}$ たわみながら最終穴位置に向かって横移動し、約2 $\mu\text{m}$ 偏心した箇所位置決めされている。

ここで、Fig.3に示す求心作用のモデルを提案する。工具と被削材が接触するまでは工具軸心と工具先端は同じ軸上にあるが、接触して被削材表面から工具先端が抵抗を受けると剛性の低い工具は弾性変形し、工具先端に遅れが生じる。工具先端では移動抵抗と工具の弾性変形力とが平衡した状態で、工具先端が内回りをして工具軸心に近づく。この成立条件は、工具先端の位相遅れ $\alpha$ が180°以下で、且つ $\angle OQP$ が90°未満のときである。

次に、被削材表面における工具先端の移動抵抗を定量評価するために、穴明け時と同様の回転数で工具を回転させながら、わずかの傾斜(角度0.29°)を与えて横送り実験を行った。Fig.4に、実験の模式図および測定例を示す。この加工深さ1 $\mu\text{m}$ までの $F_z$ および $F_{xy}(=\sqrt{F_x^2+F_y^2})$ の傾きの比より、工具先端の移動抵抗 $k_{ct}$ を計算した。

Fig.5に、移動抵抗 $k_{ct}$ の結果を示す。移動抵抗 $k_{ct}$ の平均値はA5052:0.76, SUS420:0.27, プリハードン鋼:0.22であった。このことから、A5052ではSUS420およびプリハードン鋼に比べて加工開始時に、工具先端の抵抗が大きく遅れが大きくなり強い求心作用が働いたと言える。

Fig.6に、穴位置精度の結果を示す。図中のプロット点は25穴の穴位置誤差の平均値、破線は工具の振れから予想される穴位置誤差を示している。A5052では、求心作用が強く働き穴位置精度が向上している。また、SUS420およびプリハードン鋼において、工具の振れが40 $\mu\text{mTIR}$ 以上のとき穴位置誤差が振れの片振幅より小さくなっており、求心作用が強く働いている。また、各被削材において工具の振れが15 $\mu\text{mTIR}$ 以下では振れの片振幅よりも穴位置誤差が悪化していることから、工具の振れが小さいとき求心作用は弱いと言える。

#### 4. 結言

本研究では、微小径ドリルに任意の工具の振れを与えて穴明けを行い、加工中の切削力評価および穴位置精度の測定から、求心作用の穴位置精度への影響について調査した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 工具弾性変形による求心作用のモデルを提案した。
- (2) 工具先端の移動抵抗 $k_{ct}$ はA5052で大きく、このため強い求心作用が働く。
- (3) 工具の振れが小さいとき求心作用は弱い。

#### 参考文献

- 1) H.Watanabe, H.Tsuzaka, M.Masuda: Micro drilling for printed circuit board (PCB)— Influence of radial run-out of micro drill on hole quality, Precision Engineering, 32 (2008) pp329-335

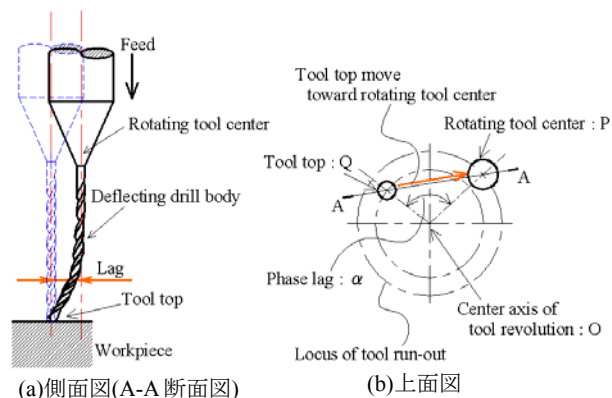


Fig.3 求心作用のモデル

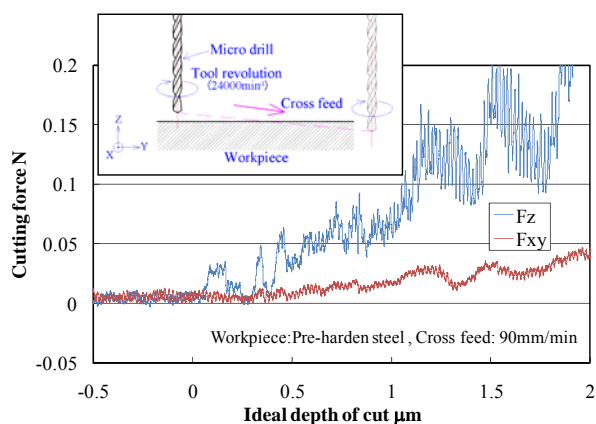


Fig.4 工具横送り実験

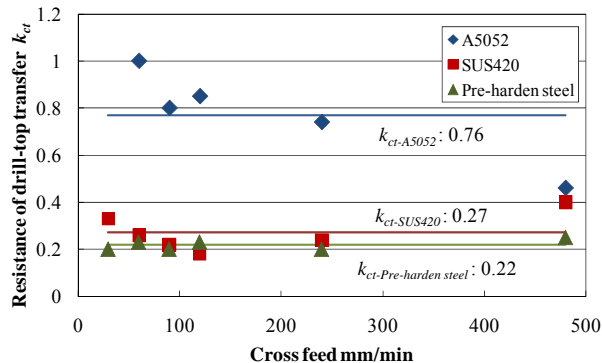


Fig.5 工具先端の移動抵抗

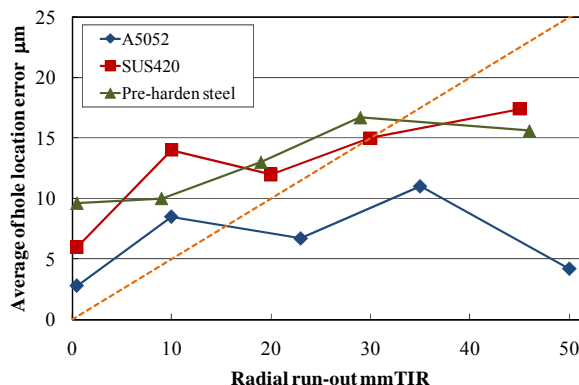


Fig.6 被削材による穴位置精度の相違