

# 振動モード制御による回転モータ不要な微細穴あけ加工技術の開発

東京工業大学 ○千賀俊哉, 東京電機大学 酒井康徳, 東京工業大学 ©田中智久

## 要旨

ドリル加工は高精度な穴を高能率に加工可能であるため、広く利用される。しかし、穴の微細化にはスピンドルの高速化が不可欠であり、ドリルの偏心・折損等が問題となっている。そこで本研究では、工具の振動モードを制御することで、一方へ高速回転させることなく高アスペクト比な穴を創成可能なドリル加工技術を開発する。試作した加工機を用いて加工原理の検証を行った結果、良好な精度の穴を加工できることが明らかとなった。

## 1. 緒言

近年、工業製品の小型化・高性能化・低コスト化に伴い、穴加工のさらなる微細化や高精度化、高能率化が求められている。特に、情報機器分野ではプリント基板(PCB)の多層化、高集積化により、PCBに対する高精度な微細深穴加工技術の確立が急務となっている<sup>(1)</sup>。また、航空宇宙産業や自動車産業ではエンジン性能の向上のために燃料噴出ノズルやタービンプレードに設ける冷却孔の小径化・多穴化が不可欠であり、高精度かつ高能率な微細穴加工技術に対する需要が高まっている<sup>(2)</sup>。

しかしながら、既存の技術では加工コストや加工精度、加工時間などに課題があり、高精度な微細深穴を高能率、低コストに加工するのは困難である。

そこで、本研究では、加工機の低コスト化を図り、動力源に回転モータを必要としない新たな加工技術を開発する。本誌では、提案手法の加工原理を試作した加工機を用いて検証し、微細穴あけ加工技術としての有用性について示す。

## 2. 提案する微細穴加工技術 SQUID (Squeeze Drilling)

本研究では、工具剛性に異方性を持たせることで所望の振動モードを得ることで、回転モータを必要としない新たな微細穴あけ加工技術 SQUID(Squeeze Drilling)を提案する。SQUID 工具とその加工原理を図 1 に示す。図示したように、剛性に異方性を持たせた部品(以下、スクイザと呼ぶ)をドリルと加振台との間に設けることでスクイズ振動(回転/伸縮複合往復運動)が発生し、ドリルの切り込み運動と切り屑の排出運動を高サイクルで切り替えることで穴加工が進展する。

断続的に切り込むため、切り屑排出や工具冷却の効率が高く、工具の長寿命化が期待できる。また、振動現象を利用しているため、小径ドリルでも瞬時周速を高くすることが可能である。さらに、微小振動するドリル先端に触れても安全であるほか、複数の

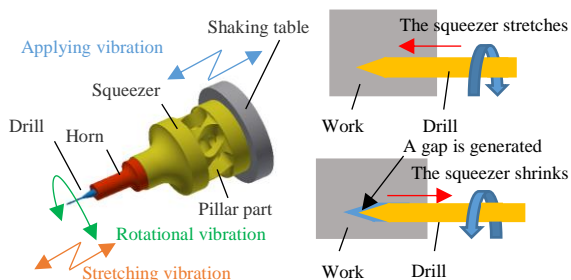


Fig.1 Over view of SQUID tool and principal of SQUID

SQUID 工具を一つの加振台の上に固定して加振することで多穴同時加工も可能となる。

## 3. 実験装置および実験方法

SQUID の加工原理を検証するため、図 2 に示す加工機を設計・試作した。SQUID 工具は動電型加振機(最大加振力:500N)にボルトで締め付けて固定し、工作物は 3 軸自動ステージ上にバイスで固定した。X・Y 軸ステージはステッピングモータで駆動され、Z 軸ステージは AC サーボモータで駆動される。

また、ドリルの振れ回り振動や軸方向振動を評価するため、図 3 に示すように渦電流式非接触変位計を設置し、ドリルの軸方向振幅と周方向振幅を測定した。周方向振幅は、ドリルに固定した検出用ターゲットの変位として検出した。

スクイザは光硬化性樹脂を用いた 3D プリンタで試作した。スクイザの形状は工具の剛性や動特性を決定する重要な要素である。そのため、COMSOL Multiphysics を用いた有限要素解析結果を基に、工具形状を決定した。また、本研究では、スクイザのピラー部の傾斜角度が穴加工に及ぼす影響を調べるため、傾斜角度が異なる 3 種類のスクイザを用意した。

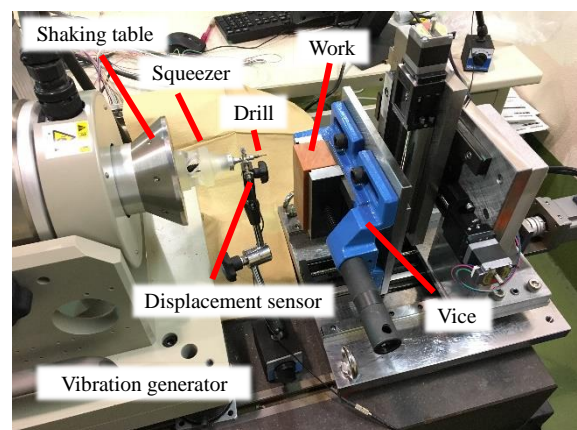


Fig.2 State of experiment equipment

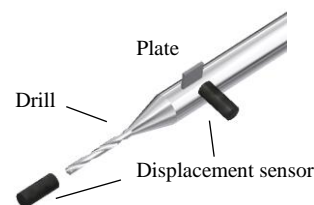


Fig.3 Measuring method

SQUIDによる穴加工実験は、表1に示す条件で行った。

Inclination angle (deg)	30, 45, 60
Feed rate $f$ (mm/s)	0.13, 0.4, 0.8
Amplitude of shaking table ( $\mu\text{m}$ )	50
Applied frequency (Hz)	150
Cooling	Dry
Drill diameter (mm)	1
Workpiece material	Chemical wood
Squeezer material	Light curing resin

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 ピラー角度が穴加工に及ぼす影響

まず、ピラー角度が異なるスクイザを用いた場合について、加振状態でドリル先端の振動振幅を測定した。各ピラー角度における工具の軸方向振幅、周方向振幅を図4示す。また、実際に開けた穴入口付近の様子を図5に示す。図4に示すように、ピラー部の傾斜角が大きいくほど、ドリルの軸方向及び周方向の振動振幅が小さくなっている。これは、傾斜角が大きいくほど回転方向の剛性が低くなり、軸方向・周方向ともに振動伝達率が低下したためだと考えられる。

図5のように、傾斜角度が $60^\circ$ の時、加工穴は良好な穴とはならず、加工途中でドリルが破損した。これは、傾斜角度 $60^\circ$ の工具では、軸方向振幅、周方向振幅がともに小さくなるのが原因と思われる。

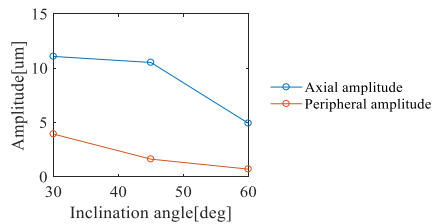


Fig.4 Influence of pillar angle on vibration of squeezer

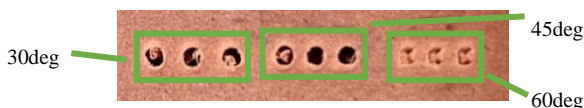


Fig.5 State of machining hole

### 4.2 送り速度が穴加工に及ぼす影響

次に、良好な穴が得られたピラー部の傾斜角度 $30^\circ$ としたスクイザを用いて、送り速度が穴加工に及ぼす影響を検討した。加工中のドリル周方向の変位を測定し、それをウェーブレット変換することで、振動振幅の時刻歴(スカログラム)を算出した。横軸が時間、縦軸は周波数、カラーバーは振動振幅を示している。

図6に送り速度を変えた場合のスカログラムをそれぞれ示す。どの送り速度でも、加工中は加振振動数(150 Hz)で大きな振幅を示している。加工穴が深くなるにつれて加振振動数での周方向振幅が大きくなっている。これは、加工穴のアスペクト比が大きくなるとスラスト荷重が大きくなり<sup>9)</sup>、SQUID工具のドリル先端がより強く拘束されるためだと考えられる。SQUIDにより、高効率な穴あけを行うためには、スラスト荷重を制御し、所望の周方向振幅をドリルに与えることが必要である。

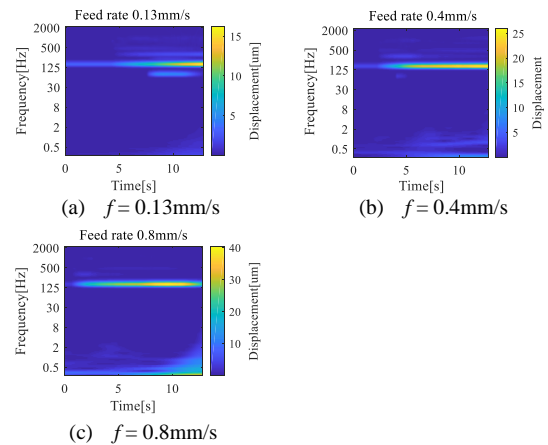


Fig. 6 Peripheral amplitude while drilling

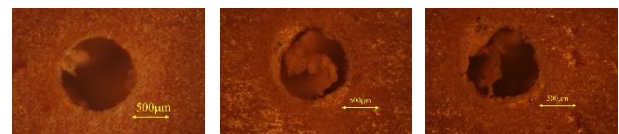


Fig.7 State of machining hole

また、図5(a)~(c)を比較すると、送り速度が大きくなるにつれ、加振振動数での周方向振幅も高くなっている。これも送り速度が高いほど、スラスト荷重が大きくなるのが要因と考える。

しかしながら、加工穴は図7に示すように、送り速度が大きくなるほど穴の精度が下がり、切り屑の排出が効率よく行われなくなるので、送り速度 $0.13\text{mm/s}$ の加工条件が良好と言える。

## 5. 結論

本研究では、振動モード制御による回転モータ不要な新たな穴加工法 SQUID の提案をした。得られた結果を以下にまとめる。

1. ピラー部の傾斜角が小さいくすると、工具の軸方向及び周方向の振動振幅が大きくなり、穴あけが可能となる。
2. 送り速度を大きくするほど、スラスト荷重が大きくなり、工具の周方向振幅が増す。

これらの知見を基に、今後は加振振動数や切り屑生成メカニズムなどを検証し、加工原理の解明とさらなる高精度・高能率化に挑戦する。

### 登壇者本人の研究への貢献

登壇者は、本研究の推進にあたり下記を主体に実施した。

- ・微細穴あけ加工に関する先行研究調査と研究計画決定
- ・試作加工機の仕様、機械要素の選定、FEMを用いた部品設計、製作、MATLABを用いた制御系の設計・実装
- ・実験および得られたデータに対する考察

### 参考文献

- 1) 渡邊英人: プリント配線板における微細穴あけ加工, 精密工学会誌, 74, 11 (2008) 1204-1209.
- 2) 増沢隆久: 微細穴加工と計測の最前線, 精密工学会誌, 78, 6 (2012) 443-447.
- 3) D. W. Kim et al.: Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel, Int. J. Mach. Tool. Manu., 49 (2008) 246-255.