

機関番号：13102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009年度～2010年度

課題番号：21760097

研究課題名（和文）超音波振動援用加工に最適化された机上成形小径工具による硬脆難削材へのドリル加工

研究課題名（英文） Ultrasonic drilling for brittle / hard-to-cut material by on-machine-formed small diameter tool

研究代表者

磯部 浩已（ISOBE HIROMI）

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：60272861

研究成果の概要（和文）：

産業界において要求の高い各種難削材に対して高精度ドリル加工する技術を開発する。ドリル工具を超音波振動させることで、加工抵抗を極限まで低くし、各種難削材への小径ドリル加工を可能にする。特に本研究においては、超音波振動援用加工に特化したドリルプロファイルを解析的・実験的に開発・設計する。そして、得られた工具形状を工作機上で成形することで、市販工具では実現できない小径ドリル加工を実現する。

研究成果の概要（英文）：

Enhancement of productivity and efficiency for handling difficult-to-cut materials to maintain competitiveness is a significant demand of profitable company management. The continuous introduction of new or modified materials created a new challenge to cutting technology. To drill deep and fine holes into components, in particular, has not been optimally solved yet despite intensive development activities the tool and cutting material sectors up to now. Vibration drilling is based on intermittent machining by pulse impact, because of tool separation from the chip. The effect of vibrating drill was designed. The vibration mode and chip generation was captured by using high-speed camera. The performance of vibration drilling where tool is manufactured by desk-top WEDM is demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21年度	2,200,000	660,000	2,860,000
22年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 生産工学・加工学

キーワード：特殊加工

1. 研究開始当初の背景

成長が期待されている燃料噴射ノズル、燃料電池、マイクロマシン、マイクロリアクタなどの高機能小型部品の材料は、セラミックス、グラナイト、超硬合金、チタン、シリコン等

やそれらのハイブリッド材料を含めて多岐に渡る。そのような難削材に高精度・高密度・多数穴で、かつL/D値（穴径に対する深さの比）の大きい傾斜穴やクロス穴を加工する技術が要求されている（図1）。さらに、

次工程の省力化のためのバリレス加工も望まれている。サブミリメートル～数十マイクロメートルの小径穴を、短時間かつ廉価に加工する要求は、各種製造業において市場が広く、多くのニーズがある。各種加工技術の比較を表1に示す。特殊加工と呼ばれる放電加工やレーザー加工は、加工力が非常に小さいため、材料の影響をほとんど受けずに加工できる。しかし、加工時間が長いために加工コストも高く、また加工精度が悪いために二次的な仕上げ加工が必要な場合が多い。そのため、加工速度や加工精度が確立されている慣用的なドリル加工の適用が望まれている。しかし、小径ドリル加工に対応するため、ドリルの形状、材質やコーティングの改良や、切削速度を得るための高速スピンドル開発や新たな切削液供給方法の開発などにより加工特性が日々改善されているが、産業界の要求に応えるには至っていない。

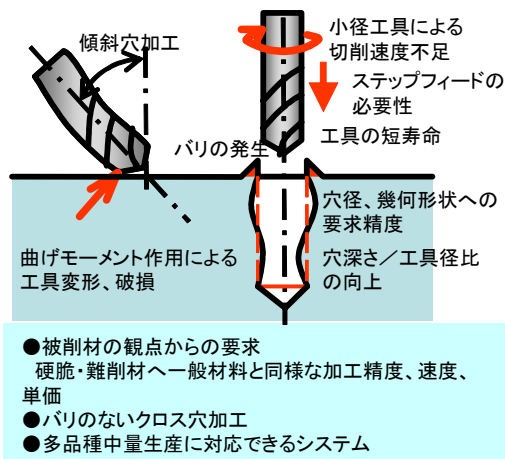


図1 ドリル加工に対する要求

2. 研究の目的

産業界において要求の高い「サブミリサイズの」小径穴」を SUS 材、焼入鋼、超硬合金、セラミックス、シリコンなどの各種難削材に対して高精度ドリル加工する技術を開発す

ることを目的とする。加工精度、加工時間、コストの観点から、産業界ではドリルでの切削加工が望まれているが、現在の技術では要求を満たしていない。また、工具寿命も不十分である。そこで、ドリル工具を超音波振動させることで、加工抵抗を極限まで低くし、各種難削材への小径ドリル加工を可能にする。特に本研究においては、超音波振動援用加工に特化したドリルプロファイルを解析的・実験的に開発・設計する。そして、得られた工具形状を工作機上で成形することで、市販工具では実現できない小径ドリル加工を実現する。

3. 研究の方法

(1) 工具成形方法

サブミリサイズの直径で、直径に対する深さの比率 (L/D 値) が 20 以上の小径穴加工を行うために、工具材質には、剛性、硬度、耐摩耗などを考慮しなければならない。これまでの基礎実験において、市販の焼結ダイヤモンドドリル工具 (φ0.4) によって超硬合金にドリル加工が可能であることを確認している。したがって、加工対象が超硬合金やセラミックス、ガラスなどの場合には、焼結ダイヤモンド工具の利用が効果的である。一方、SUS 材などの中硬度かつダイヤモンドとの親和性が高い被削材においては、加工の容易性を考慮して超微粒超硬合金 (ロックウェル硬さ 80HRC 程度) を第一に考える。しかし、超硬合金や焼結ダイヤモンドは、一般的な切削・研削加工では加工困難である。そこで、放電加工において、デューティ比などを適切に設定することで、焼結ダイヤモンド工具の放電ダメージ層をサブマイクロメートル程度まで抑える。平成 21 年度においては、小型マシニングセンタのテーブル上に設置可能な機上ワイヤーカット放電加工装置を導入し、放電加工条件を確立する。

(2) 適切な振動モードを有するドリルの開

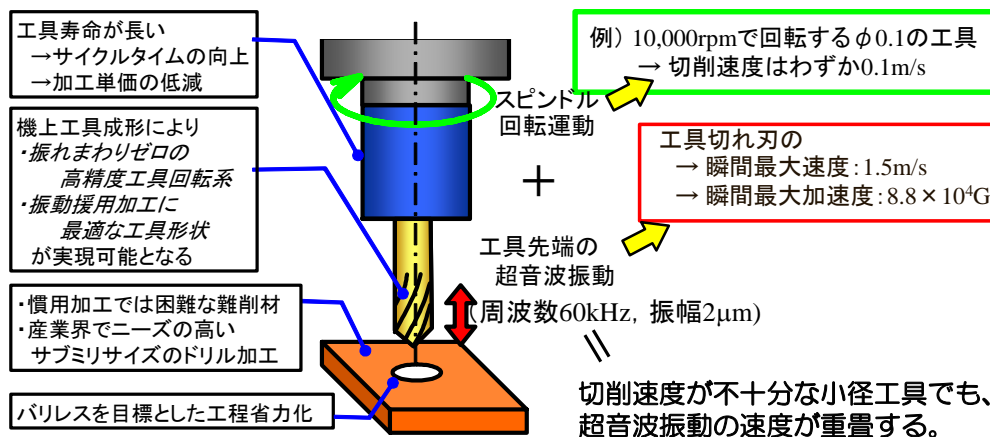


図2 超音波ドリル加工による効果

発

市販のドリル工具を超音波振動援用加工へ適用しても、工具の共振周波数の試行錯誤的なチューニングが不可欠であると同時に、振動モードが不適切である。例えば、曲げモードが励振されれば、加工される穴の形状精度が劣化し、さらに工具摩耗も促進される。本研究では、超音波スピンドルの駆動共振周波数(40kHzもしくは60kHz)の近傍において、軸方向の縦振動モードのみを有する工具プロフィールを設計する。

(3) 加工実験 1

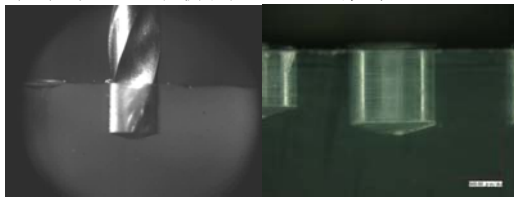
実験の第一段階では、ロックウェル硬さ40HRC程度の射出成型用金型鋼や、快削鋼などを被削材として、本加工システムの加工性能を明確にする。被加工穴の幾何精度、加工時間、バリの程度と性質、内壁面の性状(表面粗さ、加工変質層など)、加工抵抗などで評価する。

4. 研究成果

(1) ドリル振動モードの測定

ドリルの曲げ振動モードは、工具寿命を短くし、加工精度を悪化させる。そこで、シャンク長さを調整したドリルの振動モードを高速度カメラで観察した。撮影条件は、フレームレート225,000fps, シャッタースピード1/225,000sec, 画素数128×64ピクセル, 相当画角34.6μm×17.3μmとした。また、ドリルの駆動周波数は40kHz, 超音波振動振幅は2.2μmとした。したがって、超音波振動の1周期間に、5.6コマの撮影が行われる。ドリル表面の適当な特徴点(傷や工具台がねの粒子)を基準にすると、工具先端の振動方向は軸方向のみで、曲げモードに起因すると考えられる横方向への変位は確認できなかった。

(2) 切りくず排出に与える効果



c) 振動振幅 5.2μm



b) 振動振幅 3.3μm

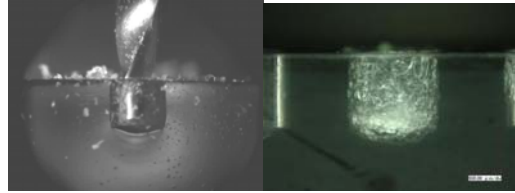


図3 高速度カメラによる切りくず排出状況の撮影と穴の性状

ドリル工具の超音波振動が、穴底部の加工領域からの切りくず排出に与える効果について、高速度カメラを用いて可視化する。特に、被削材として透明体であるアクリルを用いることで、穴底部での切りくずの生成状況についても可視化できる。加工条件を表1に示す。超音波振動の効果を確認するために、振動振幅を0~5.2μmまで変化させた。また、一般的な加工条件として、主軸回転速度は500rpm, チップロードは0.15および1μm/revで組み合わせて加工を行った。取得された任意の1フレームおよび加工された穴側面の外観図を図3に示す。動画では、超音波振動を援用することで、切りくずがフルートを滑らかに昇っていく様子が確認できた。また、加工穴内部は慣用加工および振幅3.3μmにおける超音波加工では削り痕がみられるが、振幅5.2μmにおいては、被削材が融解・凝固したような白濁した表面が観察された。

超音波振動ドリル加工の効果として、切りくずの分断による排出性向上がある。軸方向に振動する切れ刃により、切り込み深さは周期的に変動する。そして、二枚刃ドリル工具において、一方の切れ刃が創成した加工面から、ドリル半回転後に他方の切れ刃が発生させる切りくずの厚さを幾何学的に求めると、分断された切りくずが生成される条件は式(1)で求められる。

$$a \geq \frac{F}{4 \sin(\pi^2 f_d)} \quad (1)$$

ここで、 a : 振動振幅 mm, f_d : 振動周波数 Hz, F : ドリル送り速度(チップロード) mm/revである。式(1)から明らかなように、振動周波数の f_d のわずかな変化や誤差によって、右辺が周期的に変化する。本実験においては、振動振幅よりも充分小さなチップロード $F=0.15 \mu\text{m}/\text{rev}$ においては断続切削となり、振幅とチップロードが同程度である $F=1 \mu\text{m}/\text{rev}$ においては、連続切削と断続切削が混在したものとなる。

(3) 被削材内部応力分布

図4にドリル直径 $\phi 1$, 工具回転速度3000rpm, チップロード $0.16 \mu\text{m}/\text{rev}$ において、アクリルを加工した場合の応力撮影結果を示す。これより、慣用加工においては、チ

ゼル部に応力が集中しており、チゼルが被削材を塑性変形させつつ、すくい面で切りくずを生成する加工プロセスで説明できる。一方、超音波振動加工においては、切削速度がゼロとなるチゼル部の応力集中は見られず、すくい面から0.5mmほど被削材の内部において応力の高まる領域が見られた。これより、切削速度がゼロとなるチゼル部が、超音波振動によって切削加工に寄与するようになったと考えられる。

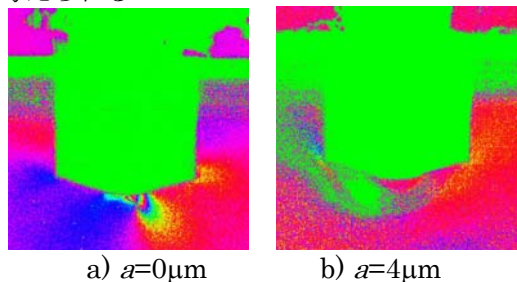


図4 応力分布図

(5) PCD ドリルの成形装置

PCD ドリルは、超硬合金軸に PCD をロウ付けしたブランクドリルから成形する。超硬合金はヤング率が約 600Gpa(参考:鋼は 210GPa)であり、剛性が高い。したがって、小径かつ長尺工具であっても、加工中のたわみを抑制できる。さらに、PCD は熱伝導率、耐磨耗性、耐チップング性、硬度が高く、工具寿命が長い。工具材質の選定と放電加工による工具成形試験を行った。PCD は絶縁体であるので、一般には放電加工は困難である。また、工具径が細くなると、超硬軸と PCD とのロウ付け部の強度が必要である。両者の特性を懸案して、導入した放電加工装置で加工可能な PCD が選定された。本事業では、工作機械スピンドルに設置したブランクドリルを機上に設置したワイヤー径 30 μ m の小型ワイヤー加工機によって、一枚刃ドリル形状へ成形する(注:市販のドリルを用いることも可能なシステムである)。成形の際には、放電によって発生するノイズによって工作機械が誤動作するのを避けるために、主電源を落とした状態で行う。装置全体の概要図を図 5-1 に示す。ワイヤー電極は、NC 制御によって、Y 方向と Z 方向の二次元平面内を位置決めできる。また、ワイヤーヘッドは、Y 軸回りにマニュアルで傾けることができる。さらに、工具台がねは、回転装置によって割り出しが可能である。この機構を使うことで、ドリル外周部を放電加工することで工具外周を加工できる。図 5 に、実際に製作した工具径 ϕ 0.3 の PCD ドリルを示す。すくい面、工具刃先など、良好な放電状態が確認できた。

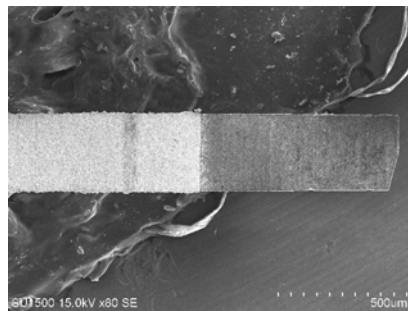


図5 製作した PCD ドリル工具(ϕ 0.3)

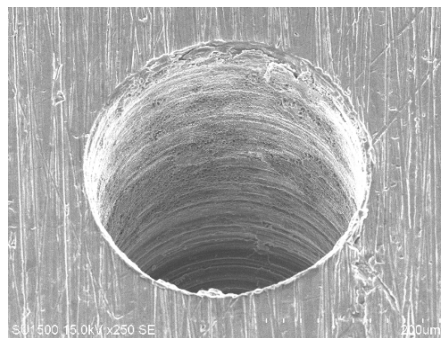


図6 自作工具で加工された穴

図 6 に片振幅 1 μ m で超音波振動援用加工した穴内壁面の SEM 写真を示す。工具径・0.3 μ m の自作 PCD ドリルにおいても超音波振動を援用することによって綺麗な内壁面が得ることができた。また開口部のバリ・ダレも少なく、良好な開口部を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

- 磯部浩已：超音波振動を援用した難削材への小径ドリル加工(第一報)－切りくず排出に与える効果の観察－, 2011 年度精密工学会春季大会(2011 年 03 月 14 ~ 16 日)p. 739-p. 740
- 植原佑介、磯部浩已：超音波振動を援用したドリル加工現象の高速度撮影, 先端加工工学会先端加工フォーラム, 2011 年 03 月 11 日
- 東山佳亮、磯部浩已：超音波振動を援用した小径ドリル加工技術の開発(第 1 報)－高速度カメラによるドリル加工現象の観察－, 2010 年度精密工学会秋季大会(2010 年 09 月 27~29 日)p. 5-p. 6

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯部 浩已 (ISOBE HIROMI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：60272861