



Y. Kakinuma

## キャビテーションを援用した超音波振動切削 による金型の高精度・高能率加工

柿沼 康弘\*

### 1. はじめに

板金加工における金属材料として耐摩耗性を改善するために、超硬合金や炭化ケイ素 (SiC) が注目されているが、特に、SiC はダイヤモンドにつぐモース硬度をもつ硬脆材料で、熱や化学的に強いことから非常に加工が難しい 1-2)。超硬合金や SiC の微細金型に対する要求は高まる一方で、低コスト化が望まれる。金型製作のコストを削減するには、工具の長寿命化と安定した加工面品位を実現する必要がある。現状では、これらの金型を加工する工具はダイヤモンドに限られ、硬脆材料を加工する際に発生する高いスラスト力が工具摩耗の進行と加工面品位の低下を招き 3)、たとえば直径 0.1~0.3mm のダイヤモンドドリルで加工した場合、数穴で工具寿命を迎える。そのため、工具寿命を飛躍的に高めると同時に加工面品位を向上させることができる、微細金型のための新しい加工法の開発が必要不可欠である。

加工負荷を低減して工具寿命の向上が期待できる加工法として、振動切削がある。特に工具に超音波振動を付与した超音波振動切削に関する研究は、国内外で広く研究されており、硬脆材料の切削においても効果が確認されている。硬脆材料の切削加工で問題になるのは、微細な粉末状の切りくずと切削液の混合物が工具表面に凝着することである。これにより工具の機能は低下し、切削抵抗が増大し、最終的には工具欠損や折損につながる。この凝着を防ぐことができれば、工具の長寿命化が期待できる。付着物を除去する代表的な技術として超音波洗浄がある。つまり、工具だけでなく、切削液にも超音波を援用すればキャビテーションによる付着防止効果・凝着物除去効果が期待できる。

### 2. 研究の目的

上述した通り、超硬合金や SiC の機械加工における工具へのダメージは、切削抵抗が高いこと、微細化した SiC の切粉による摩耗、切粉と切削液の混合物の工具表面への付着、その付着物による過度の負荷による欠損である。また、加工面品位に影響を与える原因は切粉によるスクラッチである。そこで本研究では、切削工具に超音波振動を与えて加工する超音波振動切削と、加工液に超音波振動を

えて加工液中でキャビテーションを発生させるキャビテーション援用加工を併用した複合超音波加工を提案する。超音波振動切削は、切削抵抗の低減や工具摩耗の抑制、加工面品位の向上などの効果が得られ 4)、キャビテーション援用加工は切粉の排出性と工具寿命を高める効果 5) が確認されているため、提案手法により、両加工法の相乗効果を得ることで、金型製作における工具の長寿命化と加工面品位の安定化を実現することが期待される。本研究では、始めに、金型の穴加工における超音波振動切削、キャビテーション援用加工の効果を観察実験により調べ、その結果に基づき両加工法を合わせた複合加工法の効果を評価した。

### 3. 原理

#### 3.1 超音波振動切削

切削工具へ超音波振動を与える方向はいくつかあるが、本研究では、硬脆材料である SiC を対象とするため、ドリル軸方向に超音波振動を援用して加工を行った。超音波振動を援用しない慣用穴加工では、ドリル先端のチゼル部や工具逃げ面と被削材が常に接触しているため、切削点に直に切削液を供給することはできない。一方、超音波振動を工具に作用させた場合、工具が一周期ごとに被削材から離れるため、切削液が切削点に効率的に供給される。また、超音波振動の高い加速度で工具チゼル部と被削材が繰り返し衝突するため、特に SiC をはじめとした硬脆材料に対して、材料を細かく砕き割る効果が得られる。これにより、切削抵抗が低減することが期待できる。SiC のドリル加工を行った際の超音波振動援用によるスラスト力低減効果を図 1 に示す。ステップフィードによる加工のため、加工力はパルス状に発生している。超音波振動を与えた 1 秒~3 秒の間のみ切削負荷が約 30% 小さくなっていることがわかる。また、ここでは詳述しないが、超音波振動の振幅に応じてスラスト力低減効果は変化することを確認した。

#### 3.2 キャビテーション援用加工

切削液に超音波が与えられたとき、切削液内で圧力の高低差が生じ、微小な気泡が発生・消滅を繰り返す。この現

\* 慶應義塾大学理工学部・システムデザイン工学科 准教授

象をキャビテーションという。気泡の消滅に伴って衝撃波が切削液内に伝播し、切削液の流動性が向上する。キャビテーションを加工に援用することで、切りくず排出性の向上や工具への切りくず凝着防止といった効果が得られ、工具の長寿命化が期待できる。

ただし、キャビテーション発生は液体の粘度にも依存する。実際に高粘度の油性切削油では気泡が消滅しなかった。そこで、本研究では水溶性切削油を使用することにした。キャビテーション援用加工の実験装置図を図2に示す。振動ホーンと工作物の間に切削液を満たす。振動ホーンによって切削液を加振する機構であり、振動ホーン先端部に設けられた貫通穴に切削工具を通して、加工点周りでキャビテーションを発生させた。キャビテーションを効率良く発生させるためには、ホーンと工作物のギャップが重要なパラメータである。実験的に最も高い効果を得ることができるギャップを調べた結果、本研究では、間隔を3mmで設定した。

超音波振動切削同様、キャビテーション援用加工においても、切削力を測定したところ、軸方向の切削力が約10%低減することを確認した。

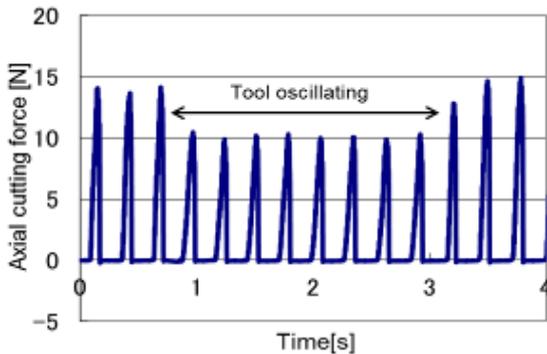


図1 超音波振動の援用によるスラスト力の低減

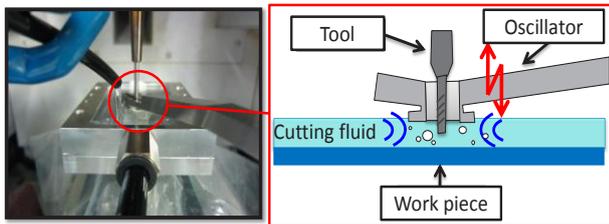


図2 キャビテーション援用加工

#### 4. 実験方法

実験装置の構成ならびに外観を図3と図4にそれぞれ示す。加工試験には3軸立形マシニングセンタ(NVD-1500, DMG 森精機製)を使用した。軸振動超音波援用切削を行うための主軸(多賀電気製)を後付けし、またホーンを介して切削液を振動させキャビテーションを発生する装置(多賀電気製)は主軸ケーシング部に取り付けられるよう

にした。ホーンと工作物の間は常に切削液で満たす必要があるため、治具は切削液を溜めることができるようにプール形状としている。また粉末状の切りくずがプール内に溜まると加工プロセスに悪影響を与える。そこで、プール内に排水口を設けフィルタを介して切削液を循環できる仕組みにした。被削材と工作機械テーブルの間に2成分切削動力計を設置し、切削トルクとスラスト力を計測した。

SiCの微細穴加工において、スラスト力と工具寿命を評価することで、複合超音波加工による超音波振動切削とキャビテーション援用加工の二つの効果を評価した。

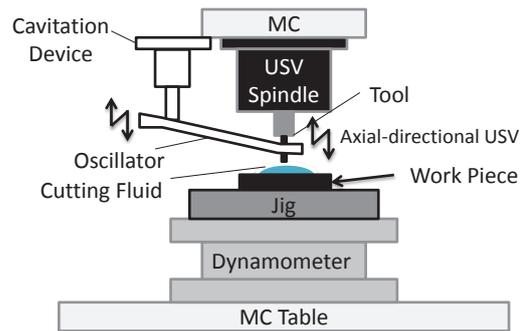


図3 実験装置のモデル図

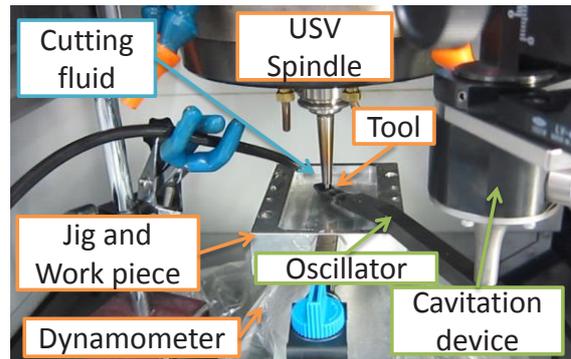


図4 複合超音波加工の実験装置図

#### 5. 高速度カメラによる撮影結果

超音波振動切削とキャビテーション援用加工の加工中の様子を、高速度カメラを用いて撮影した。用いたカメラは1,400,000 frame/秒で撮影が可能である。観察用の被削材には透明なアクリル樹脂を使用した。

##### 5.1 超音波振動切削の観察

工具には超硬ドリル(φ1.5mm)を採用し、工具先端の振動と加工中の様子を観察した。慣用加工と超音波振動切削の切りくず生成の観察結果を図5に示す。慣用加工では、連続的な流れ型の切りくずが生成されたのに対し、超音波振動切削では破碎された細かい切りくずが綿のように生成されることを確認した。この結果から、超音波振動を援用することで切りくずが十分細かくなり、切りくず排出効果が高まることが期待できる。

5.2 キャビテーション現象の観察

キャビテーションによる切りくず排出効果を観察する方法を説明する。アクリル樹脂に予め工具と同径の下穴をあける。この下穴にドリルを挿入し、下穴とドリルのねじれ溝の隙間に、切りくずに見立てた微粒子と切削液をまぜあわせたコロイド溶液を充填する。この状態で工具もしくは切削液に超音波振動を与え、その際に生じる現象を観察した。工具軸振動を与えた場合、および切削液に超音波振動を与えキャビテーションを発生させた場合の切りくず排出効果を観察した結果を図6に示す。工具軸振動を与えた場合、切削液が振動する様子は確認されるものの、切りくずが排出するまでには至らなかった。一方、切削液に超音波を与えた場合、ねじれ溝に堆積した微粒子がキャビテーション発生により、即座に排出されることがわかった。この結果から、キャビテーションを援用することで切りくず排出性が向上することが明らかとなった。

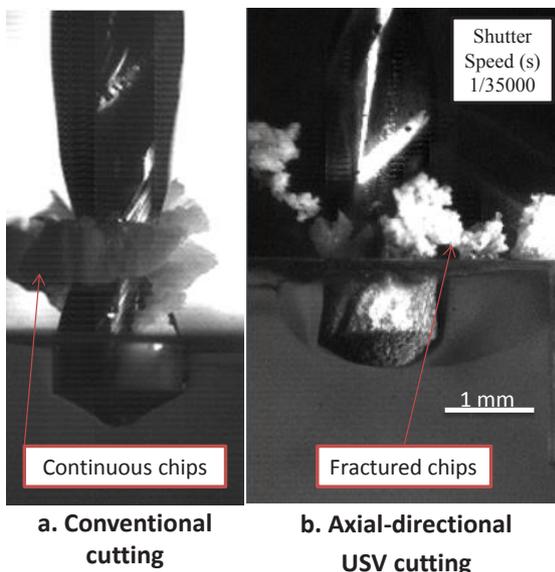


図5 慣用加工と超音波振動切削における切りくず生成の比較

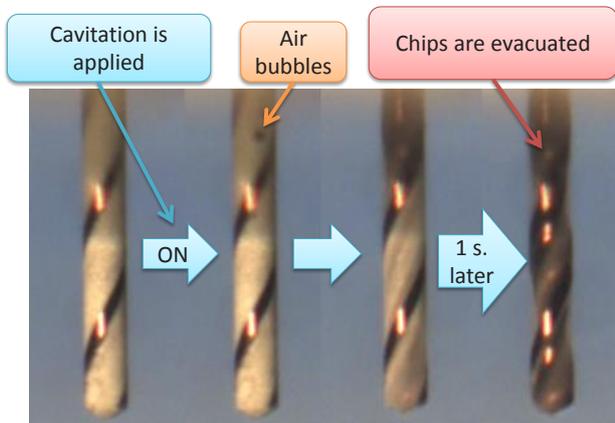


図6 キャビテーション発生時の切りくず排出性

表1 加工条件

Machining center	Three-Axis Vertical Machining Center
Axial-directional USV	70 kHz/3.5 μm
Cavitation device	42.5 kHz/2-3 μm
Dynamometer	Piezoelectric
Tool	Diamond-coated drill (φ0.22)
Cutting fluid	Soluble type
Rotational speed	8000 min <sup>-1</sup>
Feed rate	6.0 mm/min
Step feed rate	0.01 mm
Hole depth	1.0 mm

表2 工具寿命試験

Conventional drilling	12
Axial-directional USV drilling	40
Cavitation-aided drilling	56
Hybrid drilling	69

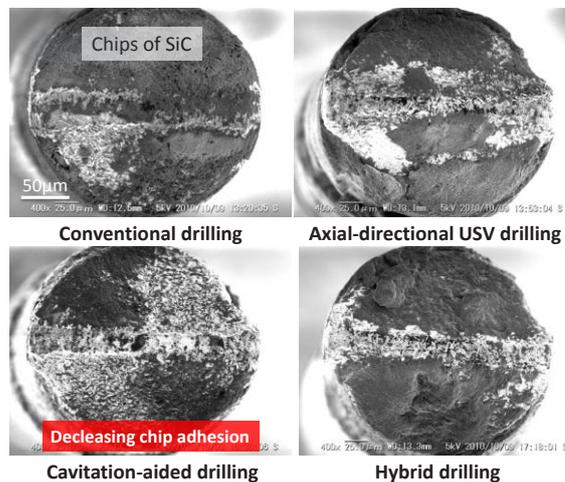


図7 工具底面の観察結果 (10穴加工後)

6. 複合超音波加工によるSiCの微細加工

慣用加工, 超音波振動切削, キャビテーション援用加工, 複合超音波加工 (超音波振動切削+キャビテーション援用加工) の4種類の加工法で試験を行い、それぞれの性能を比較した。各加工法において、工具が折損するまでに加工できた穴数をカウントし、工具寿命を評価した。表1に切削条件を示す。試験開始前にダイヤモンドセンタードリルにより下穴をあけ、ステップ送りにて加工を行った。

工具寿命試験の結果を表2に示す。慣用ドリル加工では12穴しか加工できなかったが、超音波振動切削では40穴、キャビテーション援用加工では56穴、超音波振動切削とキャビテーション援用加工により69穴加工することができた。超音波振動切削とキャビテーション援用加工それぞれ効果があることがわかるが、SiCの穴加工においてキャビテーション援用加工はより工具の長寿命化に寄与していることがわかった。さらに、複合超音波加工により工具

寿命は著しく向上した。

キャビテーション援用加工により工具寿命の向上効果が得られる理由は、切りくずの排出性にある。図7および図8に加工後の工具写真を示す。キャビテーション援用加工と複合超音波加工では、工具先端部の切りくず付着量が少ない。キャビテーションが生じることにより、工具が効果的に洗浄されたのに対し、超音波振動切削では慣用加工と比較して工具への切りくず付着量が多くなった。超音波振動切削では、切りくずが微細化され、これと切削液が混ざりあったものは粘度も高く工具先端に付着しやすい。軸方向に振動しているため、工具先端では叩きつける動作となる。微細化された切りくずを含むドロドロの切削液が、この叩きつけ効果により先端に付着して固まったのだと推察される。一方で、超音波振動切削のスラスト力低減効果や被削材の破碎効果の方が効果的に働くため、工具寿命は慣用加工の3倍近く向上したと考えられる。超音波振動切削とキャビテーション援用加工を併用した場合、工具底面では、軸振動の影響で切りくずの付着が多いものの、キャビテーションの効果により側面での切りくず凝着はほとんどない。つまり、軸振動による加工負荷の低減効果とキャビテーションの工具洗浄効果の両者を得たと考えることができ、この相乗効果により工具寿命をより一層延ばすことに成功したと言える。

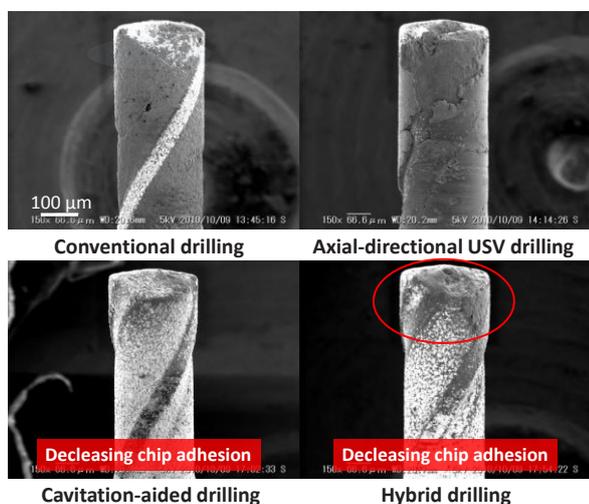


図8 工具側面の観察結果（10穴加工後）

## 7. おわりに

超音波振動切削とキャビテーション援用加工を併用した複合超音波加工を提案し、SiCの微細加工における提案手法の優位性を評価した。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) ドリルに軸方向の超音波振動を援用することで、硬脆材加工時のスラスト力を低減することができる。
- 2) キャビテーション援用加工では、工具洗浄効果により切りくず排出性が向上し、工具寿命が延長した。
- 3) 超音波振動切削とキャビテーション援用加工を併用した複合超音波加工により、スラスト力が低減されると同時に切りくず排出性が向上し、より一層、工具寿命を延長できることがわかった。

工具寿命試験、工具の観察結果より、超音波振動切削、キャビテーション援用加工がSiCの微細加工における有効な加工法であることがわかり、複合超音波加工により両加工法の相乗効果が得られることが示された。複合超音波加工により効率的な金型加工が可能になることが期待される。

## 謝 辞

本研究は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団（現公益財団法人天田財団）の一般研究開発助成のもとで行われたもので、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) W. M. Zeng, Z. C. Li, Z. J. Pei, C. Treadwell, "Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics," *International Journal of Machine Tools and Manufactures* 45(2005), pp. 1468-1473.
- (2) Reimund Neugebauer, Andrea Stoll, "Ultrasonic application in drilling," *Journal of Material Processing Technology* 149(2004), pp. 633-639.
- (3) Simon S. F. Chang, Gray M. Bone, "Thrust force model for vibration-assisted drilling of aluminum 6061-T6," *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49(2009), pp. 1070-1076.
- (4) Chandra Nath, M. Rahman, "Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48(2008), pp. 965-974.
- (5) Hitoshi Ogawa, Masahiro Masuda, Akira Mizobuchi, "Effects of cavitation on burr and tool life in micro through hole drilling 3<sup>rd</sup> report: Researches on applying ultrasonic vibration on machining fluid," *Journal of Japan Society on Precision Engineering* 74(2008), pp. 1092-1096.