

フレキシブルステージを用いた超音波振動援用研削による超硬合金の穴あけ加工

寺町亮則*1, ターヴァイネンさゆり*2, 閻 紀旺*3

Drilling of cemented carbide by ultrasonic vibration-assisted grinding on a flexible stage

Akinori TERAMACHI, Sayuri TARVAINEN and Jiwang YAN

研削による超硬合金の穴あけ加工において激しい工具摩耗や工具破損が問題となっている。それを解決するために研削抵抗を抑制することが求められている。本研究では、研削抵抗の急速な増大を防ぐ技術としてフレキシブルステージを使用した超音波振動援用研削による穴あけ加工を試みた。フレキシブルステージはばね定数が一定の複数のばねにより支持されており、工具軸方向の研削抵抗に応じて変位する機構である。本手法により、定圧に近い状態での加工が可能となり、研削抵抗を安定化させつつ工具破損を抑制できることを実証した。

Key words : ultrasonic vibration, flexible stage, drilling, grinding, cemented carbide

1. 緒言

超硬合金は高硬度、耐摩耗性、耐衝撃性をもつ材料であり、金型や切削用工具など多くの分野への応用が広がっている¹⁾。例えば、超硬合金を使用することにより金型の長寿命化を実現することができる。しかし超硬合金は難加工材であり、研削加工においては激しい工具摩耗と工具破損が発生し、加工コストの増加や工具交換による加工効率の低下などの問題が報告されている²⁾³⁾。工具摩耗および破損の主な原因として、加工進行に伴う研削抵抗の増大が考えられる。そのため、加工の安定性を向上させるためには、研削抵抗の抑制を可能とする新しい手法が強く求められている。

これまでに超音波振動援用研削が提案されており、工具潤滑性や切りくず排出性の向上による研削抵抗の低減効果が確認されている⁴⁾⁵⁾。また、工具表面のダイヤモンド砥粒の脱落と摩耗を抑制する効果もある⁶⁾。しかし、超音波振動研削の場合においても超硬合金を研削する際、研削抵抗の急増を完全に防ぐことはできない。これは、高硬度材のため加工状態にわずかな変化が生じると研削抵抗が大きく変動する結果であると考えられる。この観点から、研削抵抗を一定とするいわゆる定圧加工により、定速加工よりも安定して高品質な加工が可能であると考えられる。一方、研削抵抗を一定にするためには、送り速度を連続的に制御する特殊な装置が必要となり、生産コストの問題がある⁷⁾。また、研削抵抗の長時間測

定において温度ドリフトが生じやすいという問題もある。

そこで本研究では、**図 1** に示すように、ばね定数が一定の複数のばねによって支持され、軸方向の研削抵抗に応じて上下に変位するテーブル機構（以下フレキシブルステージという）を用いた超音波振動援用研削による穴あけ加工を提案する。この機構より、比較的簡便に定圧に近い状態で研削加工を行うことが可能となり、急速な研削抵抗の増大を抑え、砥粒脱落や工具のたわみ変形を防止できるのではないかと考えられる。本ステージは汎用機のステージに搭載して使用できるため、費用対効果は大きい。そこで本論文では、フレキシブルステージを用いた超音波振動援用研削による超硬合金の貫通穴あけを行い、研削抵抗の測定と加工後の穴や工具の観察から、本提案方法の効果の検証を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 被削材

本研究で使用した超硬合金は WC-Co 合金（株）シルバロイ製 G5）である。この材料は Co 含有率 15%、硬度 87.2 HRA、抗折力 3160 MPa、圧縮強度 4070 MPa である。被削材は 30×30×1.6 mm の板材である。

2.2 加工装置

実験装置の外観写真を**図 2** に示す。使用した加工装置は、

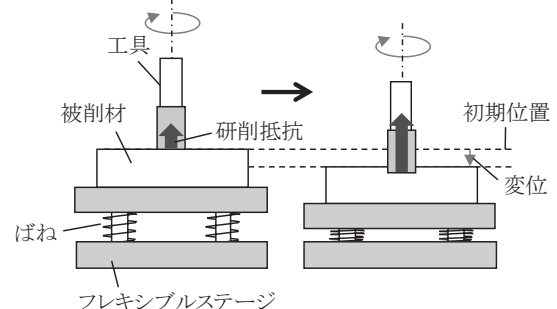


図 1 フレキシブルステージを用いた穴あけ加工の模式図

*1 慶應義塾大学大学院 理工学研究科:〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

Keio University

*2 有限会社アリュース :〒203-0042 東京都東久留米市八幡町1-1-12 機械振興協会 技術研究所 28号室

AREUSE CO., LTD.

*3 慶應義塾大学理工学部 機械工学科:〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

(学会受付日:2019年9月23日)

(採録決定日:2020年1月17日)

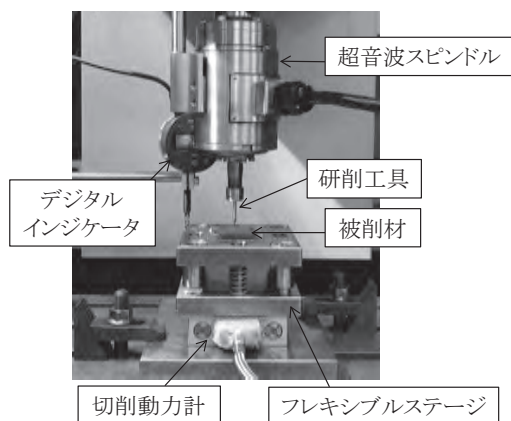


図 2 実験装置の外観写真

マシニングセンタ((株)長谷川機械製作所製 V3 型)に超音波スピンドル((有)アリユーズ製 HSK-A40 型)を搭載したものである。超音波振動発生メカニズムは、スピンドルに内蔵された圧電素子に交流電圧を印加することで超音波振動が生じ、その振動が工具に伝達し増幅される。超音波振動の方向は工具軸と同方向である。振動周波数は 25.5 kHz、振幅は 2 μm である。研削工具として、粒度#140、直径 1 mm の電着ダイヤモンド砥石を使用した。研削抵抗の測定には、水晶圧型 3 分力切削動力計(キスラー(株)製 9256C2 型)を用いた。ステージ変位の測定にはデジタルインジケータ((株)ミツヨ製 ID-S112PX 型)を用いた。

2.3 フレキシブルステージ

本研究で用いたフレキシブルステージは工具軸方向へのみ変動する機構となっている。上方向へのストッパにねじを用いており、ステージセッティング時にばねが自然長から押し縮められる場合はプリロードを与えた状態になっている。

本研究で用いた条件(ばね定数 10~20 N/mm, ステージ部品の重さ 1 kg)から、ステージの固有振動数は 16~23 Hz と計算できる⁸⁾。超音波振動周波数(25.5 kHz)と比較して極めて小さくなっているため、ステージは工具の超音波振動には応答せず、超音波振動による間欠接触の効果は損なわれないと考えられる。一方 1 ステップの加工時間は 0.6 s(1.6 Hz)であることから、ステップ送りにステージは十分に応答していると考えられる。なおこれらのことに加え、除荷時ストッパによりばねは連続的な振動運動をしないことを考慮し、ステージにはダンパーを使用していない。

2.4 実験方法

まず、フレキシブルステージにかかる負荷と変位の関係について調査するために表 1 の条件にて実験を行った。この実験は丸棒をフレキシブルステージに押し当てた際の負荷と変位を測定したものである。

次にフレキシブルステージの研削加工への影響について調査するために、表 2 の条件にて実験を行った。ステージの変位を考慮し、送り量は 2.0 mm に設定し、各穴の加工プログラムは実験 1~4 全てにおいて同じである。実験 1 はフレキシブルステージを使用しない従来の研削であり、実験 2~4 ではフレキシブルステージを使用し、それぞれ異なるばね定数を使用した。ばね定数の大きさによりステージ変位の大きさが変

表 1 ステージ負荷・変位特性調査の実験条件

ばね定数 [N/mm]	10.9	15.0	21.8
送り速度 [mm/min]	5		

表 2 異なるばね定数での研削実験条件

	実験 1	実験 2	実験 3	実験 4
フレキシブルステージ ばね定数 [N/mm]	なし	10.9	15.0	21.8
被削材	WC-Co 超硬合金			
研削工具	電着ダイヤモンド砥石 (#140)			
送り速度 [mm/min]	2			
ステップ送り [mm/step]	0.02			
回転数 [rpm]	4000			
加工雰囲気	水溶性切削油中			
工具径 [mm]	1			
超音波振動周波数 [kHz]	25.5			
超音波振動振幅 [μm]	2			

表 3 目づまり抑制実験条件

	実験 5	実験 6
ばね定数 [N/mm]	15.0	
当て板	あり(ガラス板)	
切削油供給方法	切削油中	切削油流下 (流量 1.7L/min)

わり、研削の結果に影響すると考えられる。全実験切りくず排出性の良いステップ送りをを用いた。各条件それぞれ 4 穴の連続加工を行い、研削抵抗を測定した。そして、加工後マイクロスコプを用いた穴観察と、走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)を用いた工具観察を実施した。

最後に、フレキシブルステージを用いた条件下で工具に目づまりが発生したため、その抑制を目的とした実験を行った。その条件を表 3 に示す。この実験では被削材の下に当て板としてガラス板を敷いた。実験 5 は被削材が切削油に浸かった状態で行った。実験 6 ではホースを使用し被削材や工具に切削油を供給しながら研削を行うことにした。流速を有することで工具に付着する切りくずの洗浄効果が高まると考えられる。他の条件は表 2 と同様である。

3. 実験結果および考察

3.1 フレキシブルステージの負荷と変位特性

表 1 の条件にて行った実験結果を図 3 に示す。図 3 よりフレキシブルステージは、負荷がかかると直ちに変位し始めるのではなく、閾値以上の負荷が加わると変位することが確認できる。10.9 N/mm のステージでは 45 N、15.0 N/mm では 65 N、21.8 N/mm では 100 N が閾値となっていた。ここで加工中ステージにかかる力を図 4 に示した。 W_s をステージ部品の重さ、 F_g を研削抵抗の大きさ、 d_s をステージの変位量、 l_1 を加工開始前の段階での変位量とする。加工開始前において、ば

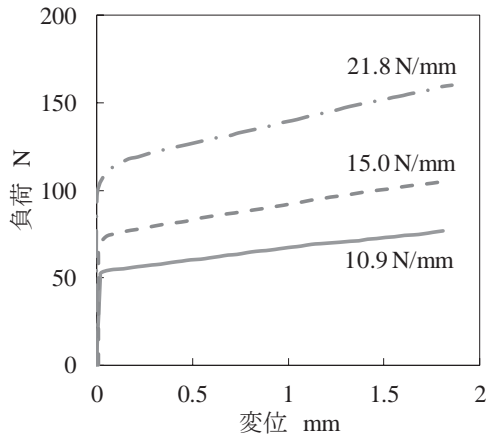


図 3 負荷と変位の関係

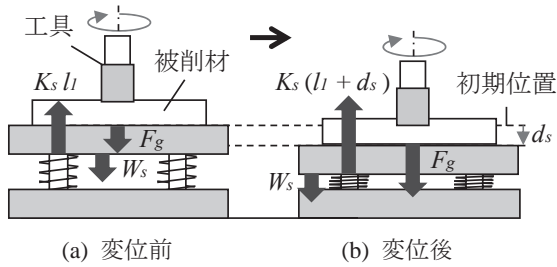


図 4 ステージ変位の模式図

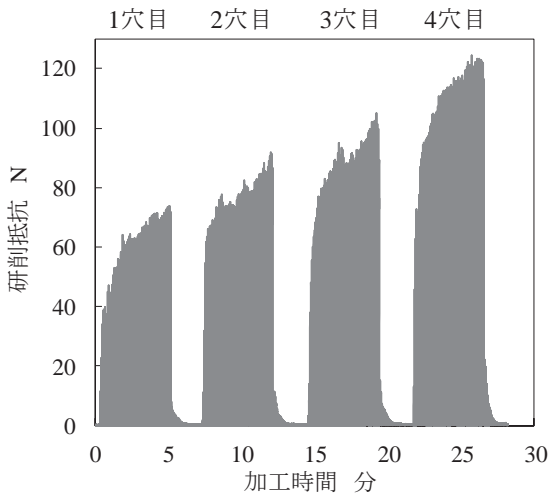


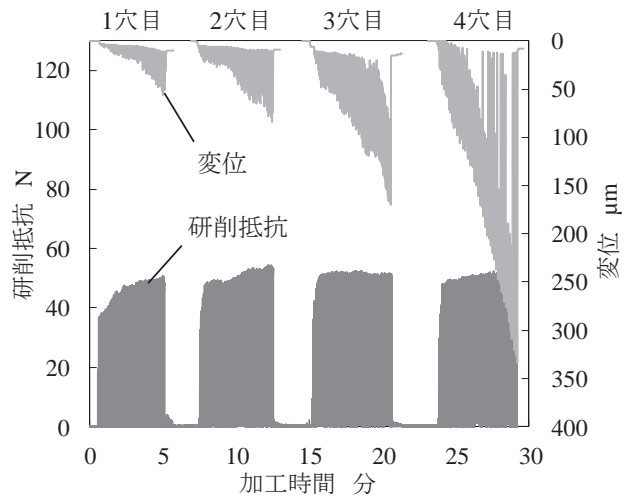
図 5 研削抵抗変化

ねは自然長の状態から l_1 だけ押し縮めて固定されプリロードが与えられた状態である。よって、加工前の段階でステージにはすでに上方向の反力がかかっている。そして、加工開始後研削抵抗が小さいとフレキシブルステージは変位しないが、大きくなると変位を始める。ステージには研削抵抗の反作用の力がかかっていることを考慮してステージにかかっている力の関係性を数式で表すと、変位前のときは図 4(a)から

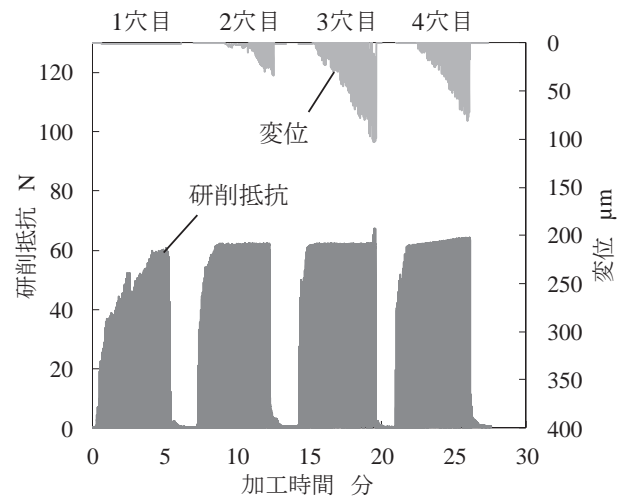
$$W_s + F_g \leq k_s l_1 \quad (1)$$

変位後の時は図 4(b)から

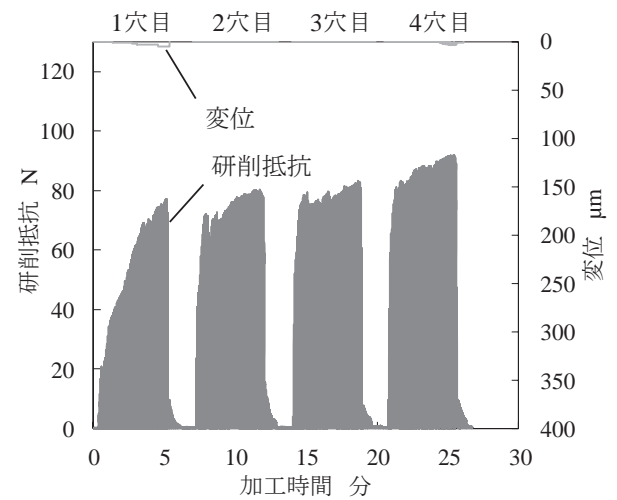
$$W_s + F_g = k_s (l_1 + d_s) \quad (2)$$



(a) 実験 2



(b) 実験 3



(c) 実験 4

図 6 研削抵抗とステージ変位の変化

となる。 k_s はフレキシブルステージのばね定数である。式(1)の右辺と左辺が等しくなる時の F_g が、ステージ変位の閾値となる。今回の条件 ($W_s: 10 \text{ N}$, $l_1: 5 \text{ mm}$) を代入すると、 $k_s = 10.9 \text{ N/mm}$ で $F_g = 45 \text{ N}$, $k_s = 15.0 \text{ N/mm}$ では $F_g = 65 \text{ N}$, $k_s = 21.8$

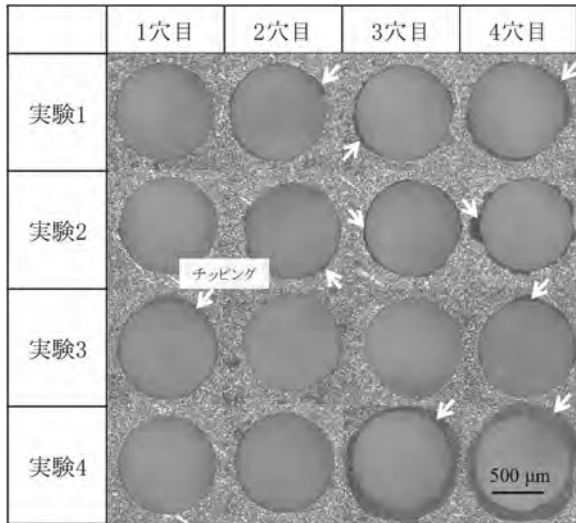


図 7 穴出口側のマイクロ스코ープ画像

N/mm では $F_g = 100 \text{ N}$ となる。この値は今回得た実験値と一致していることから、フレキシブルステージが変位し始める閾値は W_s, k_s, l_1 によって決まり、これらのパラメータを変化させることで閾値を自由に設定できることがわかった。この機構を利用すると式(2)より研削抵抗が計算できるため、非常に簡単に研削抵抗を把握することが可能になる。また、工具状態が悪化するにつれて研削抵抗は大きくなる⁹⁾ので、フレキシブルステージ変位の増大は工具状態の悪化を示す。よって工具状態を大まかに把握することも可能となる。

3. 2 研削抵抗とステージ変位

実験 1 の条件で穴あけした際の研削抵抗の測定結果を図 5 に示す。フレキシブルステージを使用しない場合、研削抵抗が時間経過とともに増大し続けている様子が確認できる。これは工具摩耗の累積が原因であると考えられる。工具摩耗が進行するにつれて研削抵抗がほぼ比例して大きくなる。

実験 2~4 の条件での研削抵抗とステージ変位の測定結果を図 6 に示す。図 6(a), (b)から、実験 2, 実験 3 において 1 穴目の初期段階を除くとそれぞれ、約 50 N, 60 N の定圧な加工が進行した様子が観察された。それぞれ 3. 1 で求めた変位の閾値での定圧加工となっている。これは閾値までは研削抵抗が増大し続け、閾値を超えるとステージが退避し研削抵抗の増大を抑制したためと考えられる。一方でステージの変位は加工が進むにつれて増加した。一般に加工とともに工具は摩耗するが、その影響がステージの変位に表れており、ステージが退避機構として機能したことが確認できた。

一方、実験 4 においてはフレキシブルステージを用いたにもかかわらず、実験 2, 3 とは異なる挙動を示しており、加工が進むにつれて研削抵抗が増大している様子が確認された。フレキシブルステージの変位も実験 2, 3 と比べて極めて小さく、固定ステージに近い状況での加工がなされたと考えられる。3. 1 から実験 4 のばね定数においてステージが変位し始める閾値は 100 N であった。今回の実験で研削抵抗は 100 N に達しておらず、その閾値まで研削抵抗は増大し続けていたと考えられる。そして閾値に達していないためステージは変位しな

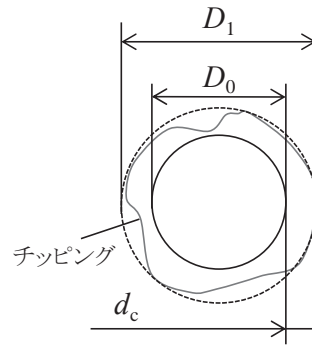


図 8 チップングサイズの測定

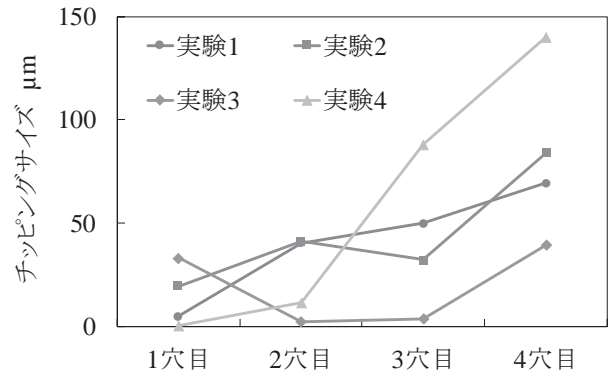


図 9 チップングサイズの変化

かったと考えられる。

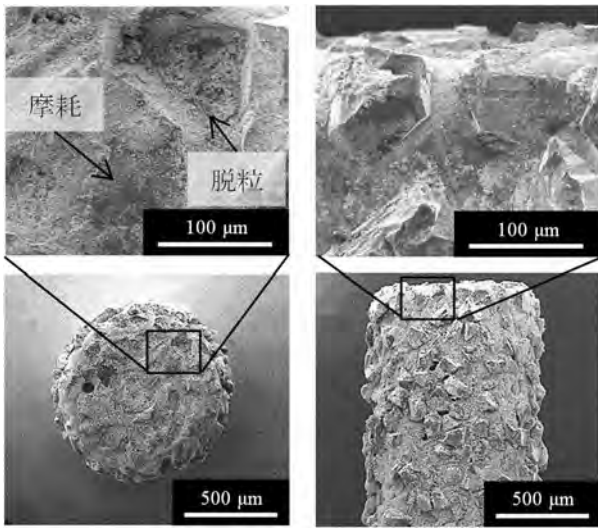
このように、加工プログラムの設定送り速度は一定でも簡単に研削抵抗を制御できる本加工法の意義は大きい。従来の定圧加工では、送り速度により研削抵抗が制御される⁷⁾。本研究においては設定送り速度は一定であっても、フレキシブルステージの変位によって被削材への相対的な送り速度が小さくなり、研削抵抗が抑制されたと考えられる。しかし、ばね定数は目的に応じて適切に設定する必要がある。実験 2 のようにばね定数が小さいと閾値が低く、加工後直ちにステージの変位が始まる。その結果、研削抵抗は大きく抑制できる一方、変位が大きくなり加工量が低下する。条件によっては上滑りを引き起こし加工がされないことも発生する¹⁰⁾。一方で実験 4 のようにばね定数が大きいと変位の閾値が高く、フレキシブルステージを用いない従来と近い加工になってしまう。そして、閾値までの研削抵抗の増大により激しい工具摩耗が生じる可能性がある。適切なばね定数を設定することで、加工効率と工具摩耗抑制を両立した加工が実現できる。

3. 3 穴の加工品質

各条件で加工した穴出口側のマイクロ스코ープ画像を図 7 に示す。図 7 より、出口側には 3 穴目、4 穴目を中心にチップングが生じている様子が観察された。次にこの画像からチップングサイズを算出した。チップングサイズの定義を図 8 に示した¹¹⁾。 D_0 は穴の直径、 D_1 はチップングの最大直径である。 D_0, D_1 から、チップングサイズ d_c は

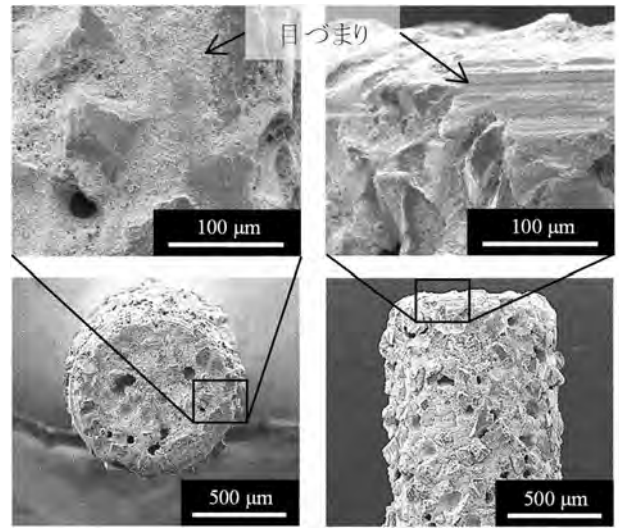
$$d_c = \frac{D_1 - D_0}{2} \quad (3)$$

のように計算される。式(3)を用いて d_c を算出した結果を図 9



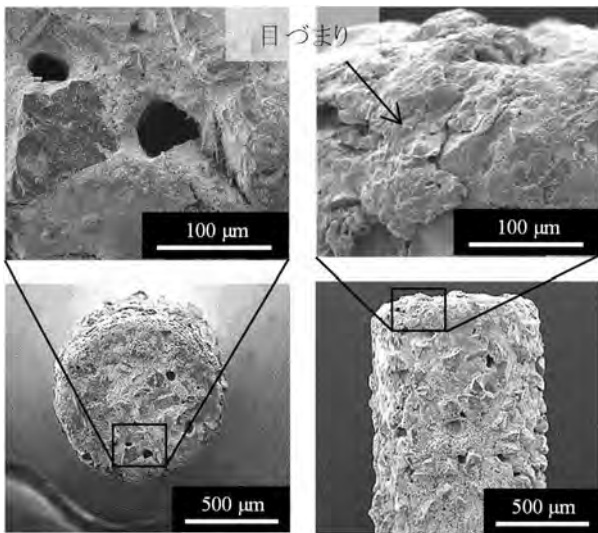
(a) 工具端面 (b) 工具側面

図 10 工具 SEM 画像(実験 1)



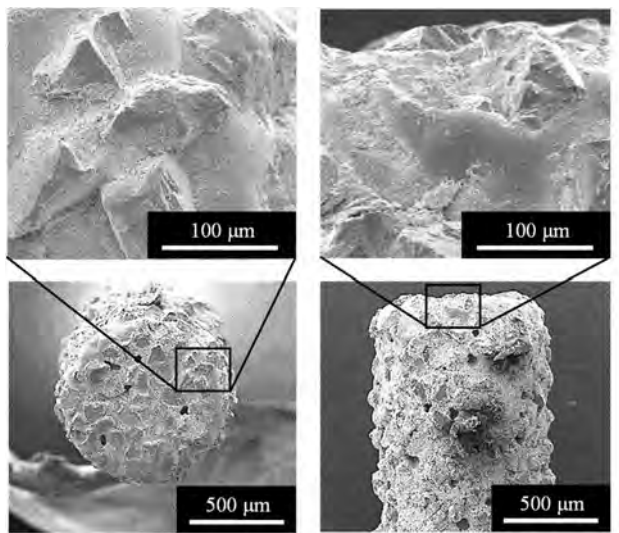
(a) 工具端面 (b) 工具側面

図 12 工具 SEM 画像(実験 3)



(a) 工具端面 (b) 工具側面

図 11 工具 SEM 画像(実験 2)



(a) 工具端面 (b) 工具側面

図 13 工具 SEM 画像(実験 4)

に示す。実験 2 では、ステージ変位が大きく切り取り量が不安定となり、大きく切り込んだ際の負荷増大によりチップング低減は実現されなかった。また実験 4 では、ステージ変位が極微小で大きな研削抵抗が作用したためチップングの増大に繋がった。一方、実験 3 においてチップングサイズは抑制され、50 μm 以下となった。これは研削抵抗が抑制され、安定した加工状態で穴が貫通したためであると考えられる。一般にチップングの大きさは研削抵抗とクラックの発生方向に関係する^{11) 12)}。したがって、ばね定数の最適化により穴出口側のチップング抑制は可能であると考えられる。また、フレキシブルステージによる研削抵抗の抑制効果に加え、工具先端形状を変更しクラックの発生箇所や方向を制御する^{13) 14)}ことで、さらなるチップングの抑制が可能になると考えられる。

3.4 工具表面形態

実験後、SEM を用いて工具の端面と側面の観察を行った。図 10~13 にそれぞれ実験 1~4 の工具 SEM 画像を示す。図

10(a)において、砥粒が摩耗により平坦になっている様子が確認できる。また、目づまりも観察された。これは摩耗によってチップポケットが小さくなったことが原因であると考えられる。加えて、拡大写真に示したような砥粒の脱落が観察された。過大な研削抵抗が作用したため脱落が生じたと考えられる¹⁵⁾。一方でフレキシブルステージを用いた実験 2~4 の結果においては砥粒の脱落は見られなかった。このことから、フレキシブルステージを用いたことによる研削抵抗の抑制効果によって、工具端面の砥粒脱落を抑制できることが明らかとなった。

しかし、実験 2, 3 において工具の端面やエッジ部分を中心に目づまりが生じた(図 11, 図 12)。フレキシブルステージが変位すると実質的な切り取り量が小さくなり、切りくずのサイズも小さくなったことで工具に付着・滞留しやすくなった。その結果、切りくずが堆積し目づまりの原因となったと考えられる。

一方、実験 4 では目づまりが生じなかった。この理由として、ステージの変位が非常に小さいため切り取り量が実験 2, 3 より

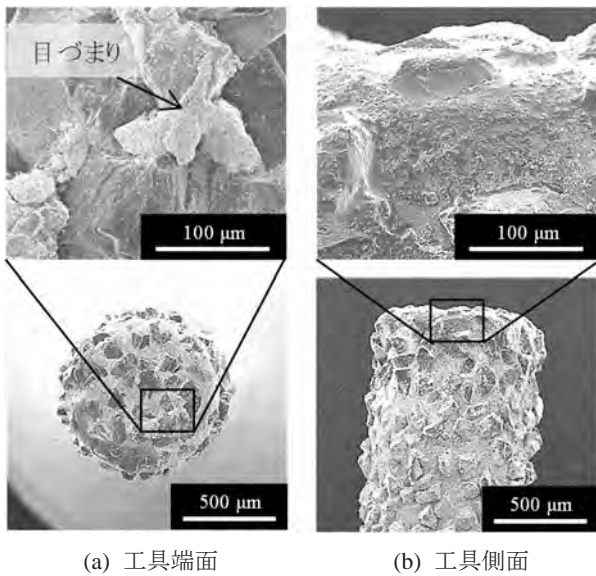


図 14 工具 SEM 画像(実験 5)

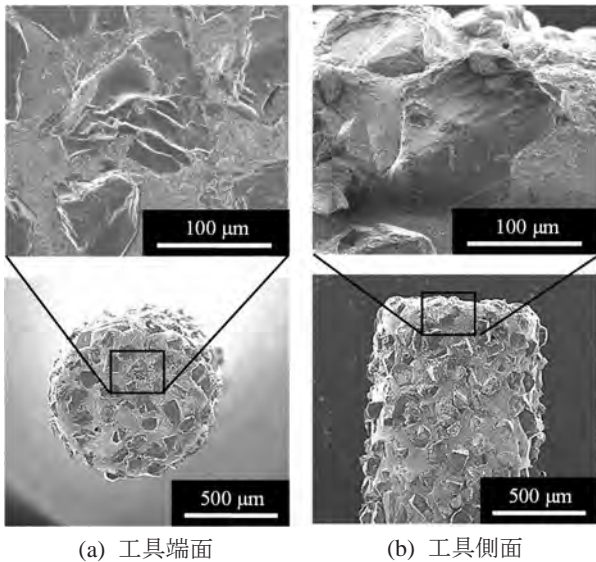


図 15 工具 SEM 画像(実験 6)

大きかったこと、そして実験 1 に比べ研削抵抗が抑えられたことでチップポケットが大きく残っていたことが考えられる。

3.5 目づまり抑制実験

フレキシブルステージを用いた際の目づまりを解消するために、表 3 の条件下にて実験を行った。その工具 SEM 画像を図 14、図 15 に示す。図 12 と比較して、目づまりが大きく抑制されたことが確認できる。各穴あけにおいて、ステージの変位を考慮し深さ 2.0 mm 送るプログラムにしたため、被削材貫通後当て板ガラスまで加工されている。そのガラスの加工中に目づまり状態の工具がドレッシングされ、工具に付着していた切りくずが除去されたことが考えられる。図 14(a)の拡大画像からチップポケットに切りくずが詰まっている様子が確認され、一部目づまりが生じていた。一方、図 15 において目づまりは生じていなかった。これより、当て板の使用にあわせて研削液を流して加工することで工具の目づまりをより大きく抑制できることが示された。

今後、フレキシブルステージの効果を高めていくには、より

高圧や高流量の研削液を供給することで、加工点と工具の間に溜まる切りくずの排出性や工具端面の洗浄効果を向上させ、目づまりをさらに抑制していくことが必要であると考えられる。

4. 結言

フレキシブルステージを用いた超音波振動援用による超硬合金の穴あけ加工を試みた。従来の研削と比較することで、ステージのばね定数が研削抵抗、加工穴や工具表面状態に与える影響について調査を行った。以下の結論が得られた。

- (1) フレキシブルステージが変位し始める負荷の閾値はプリロードとして計算でき、実験値と一致している。
- (2) 従来の研削では加工が進展するにつれ研削抵抗は増大し続けた一方で、フレキシブルステージを用いた研削では研削抵抗がほぼ一定に抑制される。
- (3) 適正なばね定数を用いることによる研削抵抗の低減効果によって、穴出口側のチップ抑制が可能である。
- (4) フレキシブルステージの使用により定圧に近い状態で加工が可能であり、急速な研削抵抗の増大を抑え、工具端面の摩耗や砥粒の脱落を抑制できる。
- (5) 工具目づまりはガラスの当て板と研削液の流れを利用することで抑制される。

5. 参考文献

- 1) J. B. J. W. Hegeman, J. T. M. De Hosson and G. De With: Grinding of WC-Co hardmetals, *Wear*, 248, (2001)187.
- 2) F. Klocke, C. Wirtz, S. Mueller and P. Mattfeld: Analysis of the material behavior of cemented carbides (WC-Co) in grinding by single grain cutting tests, *Procedia CIRP*, 46, (2016)209.
- 3) T. Yamasaki and J. Yan: High-precision drilling of CFRP by ultrasonic vibration-assisted grinding, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 59, 12, (2015)699 (in Japanese).
- 4) E. Brinksmeier, Y. Mutlugünes, F. Klocke, J. C. Aurich, P. Shore and H. Ohmori: Ultra-precision grinding, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 2, (2010)652.
- 5) M. Jin: Manufacturing technology by application of ultrasonic vibration, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 82, 5, (2016)403 (in Japanese).
- 6) K. Hara, H. Isobe, A. Kyusojin and M. Okada: Ultrasonically assisted grinding of die steel using diamond electroplated tools, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 52, 1, (2008)46 (in Japanese).
- 7) J. Y. Shen, C. B. Luo, W. M. Zeng, X. P. Xu and Y. S. Gao: Ceramics grinding under the condition of constant pressure, *Journal of Materials Processing Technology*, 129, (2002)176.
- 8) 磯部浩巳, 原圭祐: 超音波振動加工技術 装置設計の基礎から応用, 科学情報出版, (2017).
- 9) 吉川弘之: 研削工具の寿命, *精密機械*, 30, 1, (1964)112.
- 10) B. S. Linke, I. Garretson, F. Torner and J. Seewig: Grinding Energy Modeling Based on Friction, Plowing, and Shearing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139, 12, (2017)121009.
- 11) J. Wang, P. Feng, J. Zhang, C. Zhang, and Z. Pei: Modeling the dependency of edge chipping size on the material properties and cutting force for rotary ultrasonic drilling of brittle materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 101, (2016)18.
- 12) J. Wang, H. Zha, P. Feng and J. Zhang: On the mechanism of edge chipping reduction in rotary ultrasonic drilling: A novel experimental method, *Precision Engineering*, 44, (2016)231.
- 13) A. Mizobuchi, I. Tada and T. Ishida: Development of electroplated diamond tool for fracture size minimization in miniature drilling of glass plate, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 58, 5, (2014)321 (in Japanese).
- 14) J. Wang, P. Feng and J. Zang: Reducing edge chipping defect in rotary ultrasonic machining of optical glass by compound step-taper tool, *Journal of Manufacturing Processes*, 32, (2018)213.
- 15) Y. Zhang, Y. Tani and J. Murata: Development of partially Ni-coated diamond abrasives for electroplated tools, *Transactions of the JSME*, 80, 813, (2014)SMM0111 (in Japanese).