

硬脆材料の切断における超音波援用の有効性

ー切断面の低ダメージ効果ー

Effectiveness of ultrasonic-assisted cutting for hard and brittle materials

- Effect on damage reduction of the cut surface -

森本 竜広（装置事業部 超音波技術グループ） 三田 恭宏（装置事業部 超音波技術グループ）

松山 裕宣（装置事業部 超音波技術グループ） 久保 直樹（装置事業部 超音波技術グループ）

Tatsuhiro Morimoto, Yasuhiro Mita, Hironobu Matsuyama, Naoki Kubo (Electronics Equipment Dept. Ultrasonic Engineering Group)

現在、加工が難しいと言われている硬脆材料の加工方法について、硬脆材料の特性・切断原理・破壊のメカニズムの観点から、従来の切断方法に比べ超音波を援用することによる有効性が述べられてきたが、定量的な評価例はあまり報告されていない。そこで本研究では、切断面の硬度と表面粗さを測定し、超音波援用の効果を検証した。

Recently, as a machining method for hard and brittle materials, which are considered to be difficult-to-machine materials, ultrasonic-assisted cutting has been discussed. Moreover, its effectiveness has been compared with that of conventional cutting methods from a viewpoint of the characteristics, cutting principle, and breakage mechanism of hard and brittle materials; however, very few quantitative evaluation examples have been reported. Therefore, in this study, we measure the hardness and roughness of the cut surface to evaluate the effectiveness of ultrasonic-assisted cutting.

1. はじめに

現在、加工が困難とされている硬脆材料の切断において、当社独自の両端支持機構に超音波振動を付加したスピンドルを採用したことで、従来の切断方法に比べ高速度化・高品質化を達成できた¹⁾。この結果が得られた要因として、超音波カッティングによる破碎効果（ハンマリング作用）、クリーニング効果（目詰まり防止）、断面研磨効果（断面品質の向上）の3つの効果が挙げられる。これらの効果により、脆性材料や複合材などの難削材をダメージが少ない状態で一度に切断することが可能となるが、超音波振動の付加によって、どの程度までダメージを抑えることが可能であるかを実証した定量的な評価・検証例は見当たらない。

一般に、加工により材質的に変化した表面層は加工変質層と呼ばれる（図1）。変質の原因として、機械的エネルギーによるもの、熱エネルギーによるもの、この両者を複合したものなどが挙げられ、機械的エネルギーによって塑性変形による表面の格子欠陥の乱れや増加、結晶粒の変形、微細化、あるいは表面流動等を起こし、また熱エネルギーによって相変化、組織変化、熱亀裂の発生を起こすと考えられている。そして、この加工変質層では残留歪みが発生しており、残留応力によるエネルギーが蓄えられた状態であると考えられている。そこで本研究では、加工変質層部分の調査、特に加工変質層の硬度に着目し、超音波援用によるダメージの少なさの評価

を、また、表面粗さを測定し、断面研磨効果に関する定量的な評価を行い、超音波援用の有効性を明らかにしたので以下に報告する。

2. 実験方法

2. 1 供試試料

供試試料として、クリー社製 4H-SiC ウエハを両面研磨、Si面をCMP処理後、5mm×7mmのサイズに切断したものを使用した。

2. 2 実験装置および実験条件

実験には、図2に示す当社独自の両端支持回転体構造スピンドルを備えた切断装置を用いた。このスピンドル

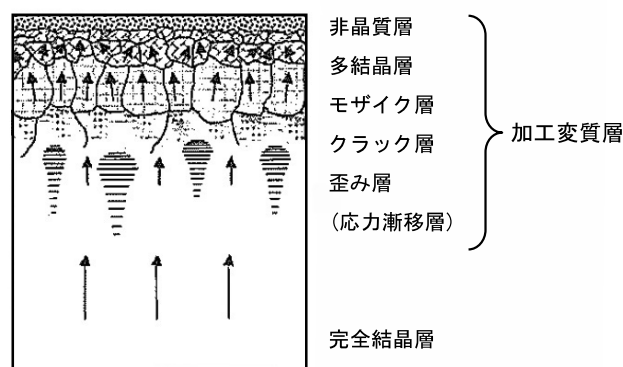


図1 単結晶材料における加工変質層の模式図²⁾

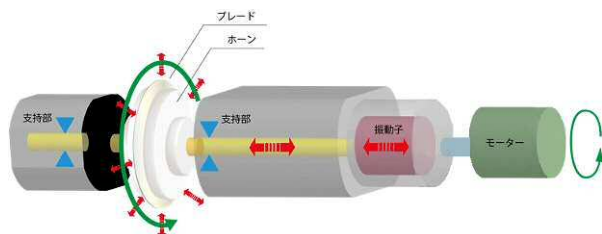


図2 両端支持回転体構造スピンドル概略図

表1 実験条件

ブレード	砥粒	SD#1200
	外径	97 mm
	刃厚	0.07 mm
スピンドル回転数		8000rpm
切断速度		1, 5, 10 mm/s
超音波出力		0, 40, 60, 80 %

は、特殊ブレードホーン両端を支持することで、高剛性、高い機械安定性および安定した超音波振動の伝播を実現している。また、特殊ブレードホーンにより、超音波振動は振動方向変換体理論³⁾に基づいて R-L 変換され、ブレード径方向へ振動振幅を伝搬させる。

実験条件を表1に示す。超音波の振動振幅の影響を確認するために、振動振幅無し（超音波出力：0%）と振動振幅有りの状態で切断を実施した。超音波無しでは、硬脆材料である SiC は低速でしか切断できないため、かろうじて切断可能な切断速度 1mm/s とした。超音波有りでは、切断速度と超音波出力の影響も確認するため、切断速度を 1mm/s, 5mm/s, 10mm/s とし、超音波出力を 40%, 60%, 80% とした。

2. 3 評価方法

加工変質層の硬度は、マイクロビッカース硬度計によって測定を行った。また、表面粗さは表面粗さ計を用いて測定を行った。いずれも測定箇所は切断面で、N 数として 24 箇所測定し（図3）、その平均値を求めた。

また、硬度については切断面以外の母材部（SiC における Si 面側）の硬度を基準とした。

2. 3. 1 マイクロビッカース硬度計

マイクロビッカース硬度計は、島津製作所製の HMV-02 を使用した（図4）。硬度計の圧子を測定点に押し付け、図5に示すようなひし形の押し付け痕の対角線寸法を計測し、式(1)、(2)よりビッカース硬度（Hv）を求めた。

$$d = \frac{a+b}{2} \times 10^{-3} \quad \dots (1)$$

$$Hv = 0.1891 \times \frac{F}{d^2} \quad \dots (2)$$

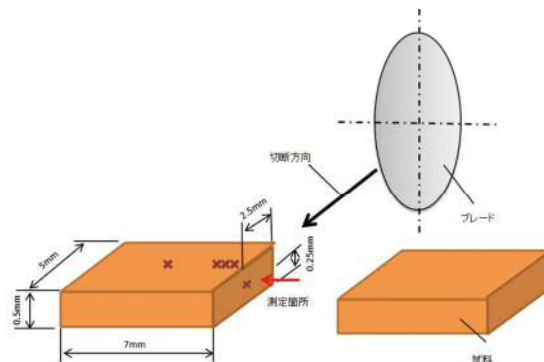


図3 測定箇所模式図



図4 マイクロビッカース硬度計

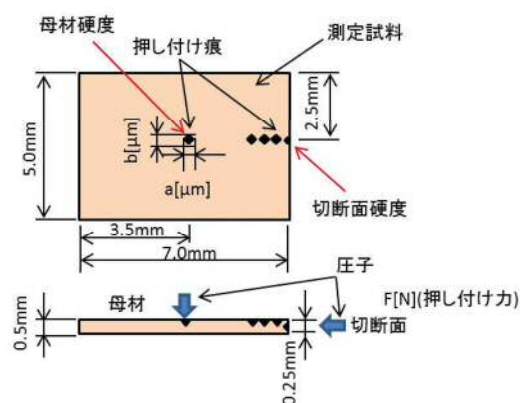


図5 硬度測定位置

また、圧子を押し付けた際に、クラックが発生することがあったため、クラックの発生しない押し付け力にて計測を行った。

2. 3. 2 表面粗さ計

表面粗さの計測には、東京精密製のサーフコム 130A を使用した（図6）。



図6 表面粗さ計

計測条件は測定長さ 1.25mm、測定速度 0.3mm/s とした。粗さ数値は算術平均粗さ Ra にて評価した。測定位置は、試料厚さ 0.5mm に対して、中心部の 0.25mm 部分を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 超音波援用切断面の硬度測定による低ダメージ加工の評価

図 7 に示す SiC 切断面における超音波出力とビッカース硬度の関係より、切断による加工変質層と考えられる切断面の硬度は母材の硬度より低下していることがわかる。硬度の低下割合は、超音波無しの状態が最も大きく、超音波出力を上げることで、硬度が上昇し、母材の硬度に近づく傾向にある。また、切断速度を上昇させることにより、硬度の低下が抑えられていることがわかる。

Si 面における切断端面からの距離とビッカース硬度の関係を図 8 に示す。試料の上面において、切断端面から切断面に垂直方向に 10 μ m ピッチで硬度測定を行った結果、超音波有り、無しともに端面から 10 μ m 以内の範囲で、品質の劣化が発生しているものと考えられ、SiC 切断における加工変質層の発生は切断面の微小領域で起こることがわかる。

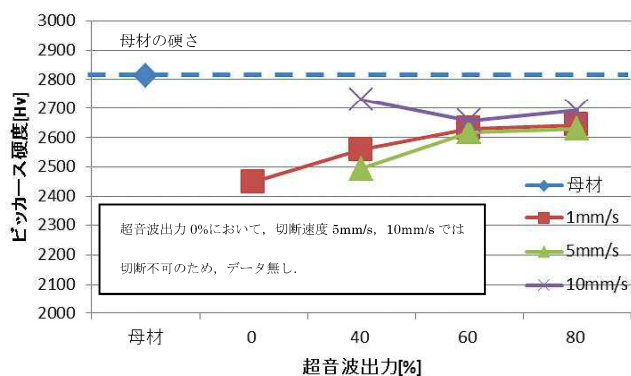


図 7 SiC 切断面における超音波出力とビッカース硬度の関係

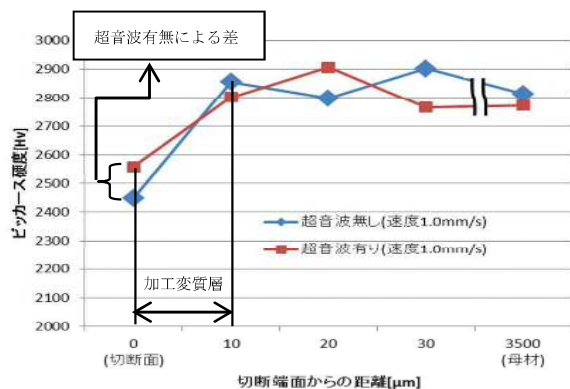


図 8 Si 面における切断端面からの距離とビッカース硬度の関係

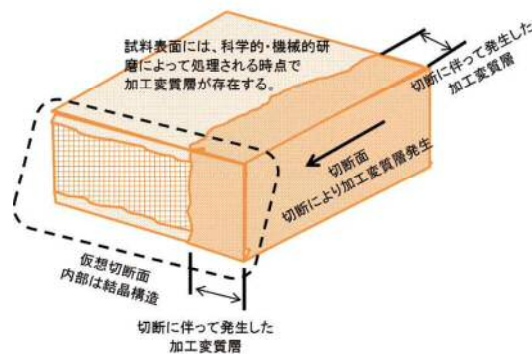


図 9 試料の加工変質層の模式図

試料は、切断した断面以外の面も研磨などを行って形成されているため、全体にわたって加工変質層は発生しているものと思われる。試料形成による加工変質層は切断によるものより小さいものと思われるため、切断面との差が生じると考えられる (図 9)。

SiC のような硬脆材料の切断においては、超音波振動によるハンマリング作用が効果的に働き、切断面に対する負荷が小さくなるため、超音波無しの場合と比較して、切断面の加工変質層内における硬度低下が小さくなり、切断面へのダメージを抑えた切断が可能となると考えられる。また、切断速度を上昇させることにより、切断面に力を与えている時間(ブレードが接している時間)が短くなるため、切断面へのダメージが小さくなり、硬度が維持されたと考えられる。

SiC 単結晶のような硬脆材料は、加工変質層内の非晶質層・多結晶層が微小であるため、硬化には至らず、さらにその内側に発生しているモザイク層・クラック層により、硬度の低下が発生するものと推測される。

3.2 表面粗さによる断面研磨効果の評価

SiC 切断面における超音波出力と表面粗さの関係を図 10 に示す。表面粗さは、超音波無しの場合が最も大きく、超音波有りの場合は小さくなり、切断面は滑らかになる。超音波出力による表面粗さの変化は小さいが、切断速度が

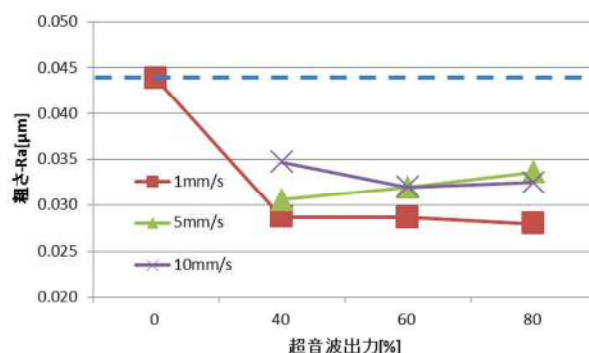


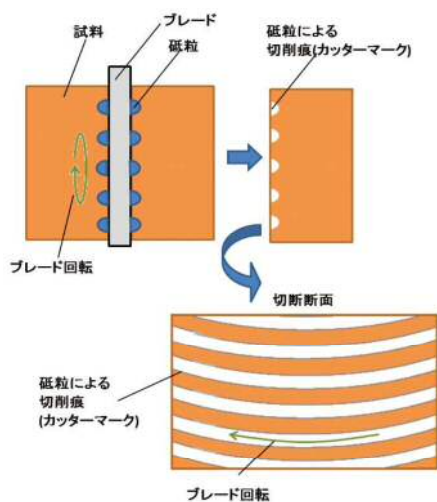
図 10 SiC 切断面における超音波出力と粗さの関係

1mm/s と 10mm/s の場合は、高出力になるほど表面粗さは小さくなる。一方、切断速度を上昇させることにより、表面粗さは粗くなる。

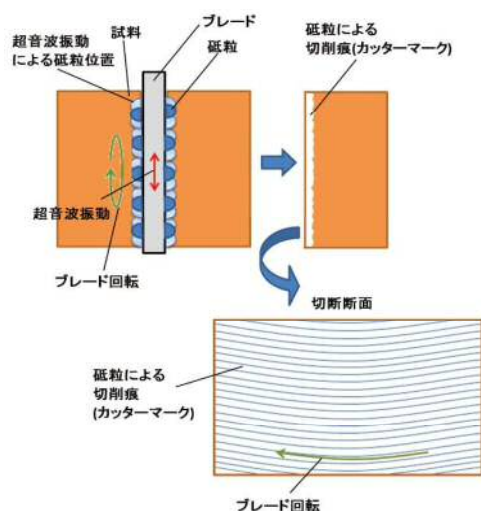
図 1 1 に切断面の切削痕の模式図を示す。一般的なブレード切断の場合は、ダイヤモンド砥粒一つひとつが試料を削るため、切断面の凹凸が大きく、切削痕（カッターマーク）が切断面に残る（図 1 1-（a））。

一方、超音波振動をブレードに付加すると、切断時にダイヤモンド砥粒一つひとつが振動し、切断面の凸部を削るため、切断面の凹凸が小さく平坦化され、研磨効果が得られる（図 1 1-（b））。ブレードのメッシュ（目）が細かいほど研磨効果は上がり、相乗効果として切削水流入による冷却効果、切削屑の排出効果も加わり、断面品質の良好な切断が可能となると考えられる。

ただし、切断速度を上昇させると、切断面の研磨時間は短くなるため、切断面の表面粗さは粗くなるものと考えられる。



(a) 一般的なブレード切断



(b) 超音波援用切断

図 1 1 切断面の切削痕模式図-超音波援用切断

4. おわりに

本研究では、硬脆材料の切断における超音波の援用が切断品質に及ぼす効果を定量的に評価するため、硬度および表面粗さの測定を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 硬脆材料の切断において超音波を援用した場合、超音波を援用しない場合と比べ、切断面の硬度の低下が抑えられるため、切断面のダメージを抑えた切断が可能である。
- (2) 硬脆材料の切断において発生する加工変質層の深さは 10 μ m 未満であると推定される。
- (3) 超音波を援用することにより、切断面の表面粗さを小さくすることが可能である。

<謝 辞>

本研究を進めるにあたり、ご指導・ご鞭撻を頂きました国立大学法人九州工業大学と高田工業所にて結成した精密加工研究会のメンバーである九州工業大学の中野光一特任准教授、高田工業所の五島宏氏、森伸廣氏に深く感謝いたします。また、評価装置のマイクロビッカース硬度計を貸与頂きました九州工業大学の中野研究室にも深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森本竜広：超音波を利用した硬脆材料の精密研削加工に関する考察，高田技報，Vol.24，pp6-9，（2014）
- 2) 松永正久他：エレクトロニクス用結晶材料の精密加工技術，（株）サイエンスフォーラム，p577，（1985）
- 3) 伊藤勝彦，森栄司：振動方向変換体の研究（R-L 変換体），日本音響学会誌 29 巻 5 号，pp.307-314，（1973）



森本 竜広 Tatsuhiko Morimoto
（株）高田工業所 装置事業部
超音波技術グループ