

硬脆材料の切断における超音波援用の有効性 -第2報-

Effectiveness of ultrasonic assist in cutting hard and brittle material - The second report -

森本 竜広 (装置事業部)

三田 恭宏 (装置事業部)

久保 直樹 (装置事業部)

四元 敬一 (装置事業部)

Tatsuhiko MORIMOTO, Yasuhiro MITA, Naoki KUBO, Keiichi YOTSUMOTO
(Electronics Equipment Dept. Equipment 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、切断抵抗、切断面の硬度および切断時に発生するチッピングの評価を行い、超音波援用の有効性を検証した。

Hard and brittle materials are said to be difficult to machine; currently, concerning machining methods for such materials, from the perspective of the characteristics, cutting principle, and breakage mechanism of the material, the effectiveness of ultrasonic assist has been indicated. However, few quantitative evaluations have been reported. Therefore, in this study, we evaluated the cutting resistance, hardness of cut surfaces, and chipping occurrence during cutting to verify the effectiveness of the ultrasonic assist.

1. はじめに

加工が困難とされている硬脆材料の切断において、現在、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用いて切断することで、従来の切断方法と比べ、高速度化・高品質化を達成できている¹⁾。この結果が得られた背景には、超音波カッティングに関する破砕効果(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ている。

これらの効果により、脆性材料や複合材などの難削材でも効率よく切断ができ、切断対象へのダメージを抑えた状態で切断を行うことが可能となってきた。これは超音波を援用させることにより切断抵抗が低下し、硬脆材料でも切断可能になると考えられている。一方、超音波振動の有無によってどの程度ダメージを抑えた切断が可能であるかを実証する定量的な評価・検証例はあまり見られない。一般に加工を行った面は材料組織の変化が生じると考えられるため、この加工部分の影響範囲(加工変質層)を調査することで、超音波援用による切断が通常の切断と比べ、より低ダメージな加工方法であると評価することが可能と考えられる。そこで硬脆材料である数種類のファインセラミックスを使用し、超音波援用による切断抵抗の低下と切断面近傍の硬度測定による低ダメージ加工効果の評価および試料毎による切断品質を検証するため、表面・裏面のチッピング(被切断物の切断面に割れや欠けが入る現象)の観察を行い、超音波援用切断の有効性の検証を試みたので、以下に報告する。

2. 実験方法

2.1 供試試料

切断抵抗の低下と切断面近傍の硬度測定による低ダメージ加工効果の評価用の供試試料として、ファインセラミックスである石英ガラス、アルミナ、ジルコニア、窒化アルミおよび炭化ケイ素を用い、それぞれ20mm×3mmのサイズに切断を行うことで評価した。

また、チッピング評価用の供試試料として、現在SAWフィルタやLEDなどの材料として普及しているリチウムタンタレートおよび人造サファイアを使用した。

2.2 切断実験装置

実験には、当社独自の両支持回転体構造の超音波スピンドルを用いた。このスピンドルは、特殊ブレードホーン両端をホルドすることで、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。ブレードホーンにより、超音波スピンドルの回転軸の内部に配置した部品を伝播する縦波の超音波振動は振動方向変換体理論²⁾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ている。

2.3 評価方法

2.3.1 切断抵抗の低下と低ダメージ加工効果の評価

切断抵抗を評価するため、切断時におけるスピンドルのモータ電流値を測定した。また、加工変質層の範囲を調査するためにマイクロビッカース硬度計により、切断面と切断面近傍を測定した。マイクロビッカース硬度計は、島津製作所製の HMV-02 (図 1) を使用した。硬度については基準として切断面以外の健全な母材部を測定し、比較した。図 2 にビッカース硬度の測定位置を示す。押し付け痕の対角線寸法を計測し、式(1)、(2)にて計算することにより、ビッカース硬度 (Hv) を求めた。

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

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

a, b : 押し付け痕対角線 (μm) , F : 荷重 (N)

切断抵抗の低下と硬度測定による低ダメージ加工効果の評価については、表 1 に示す条件で切断を行った。一般的にブレードの砥粒の粒度が細くなるほど、切断時の切断抵抗が上昇し、ブレードが破損しやすいため、粒度が細かい場合 (#2000) では切断速度を 0.1mm/s、0.5mm/s とした。粒度が粗い場合 (#600) は切断速度を 1mm/s、5mm/s とした。超音波出力は、0%、40%、80% の 3 条件とした。

2.3.2 チッピング評価

チッピング評価については、表 2 に示す条件で切断を行い、切断したラインの表面と裏面をマイクロ스코プにより観察し、チッピングのサイズを測定した。実験計画法のタグチ配列法に基づき、9 通りの切断条件にて、傾向評価を行った。



図 1 マイクロビッカース硬度計

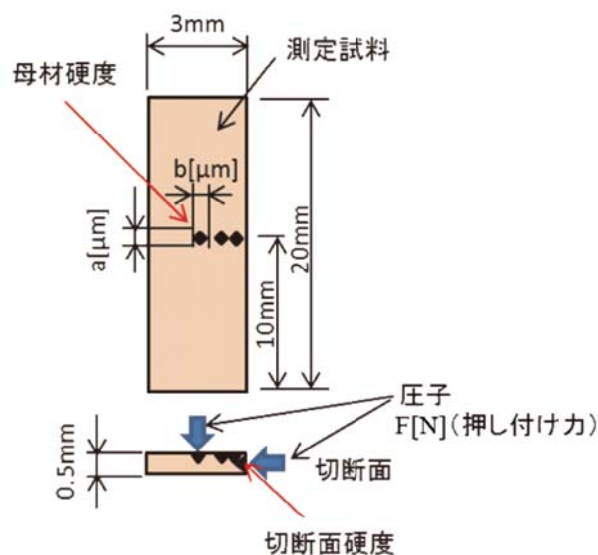


図 2 硬度測定位置

表 1 切断抵抗の低下と低ダメージ加工効果の評価実験の切断条件

砥粒の粒度	#600	#2000
切断速度	1mm/s, 5mm/s	0.1mm/s, 0.5mm/s
超音波出力	0%, 40%, 80%	

表 2 チッピング評価実験の切断条件

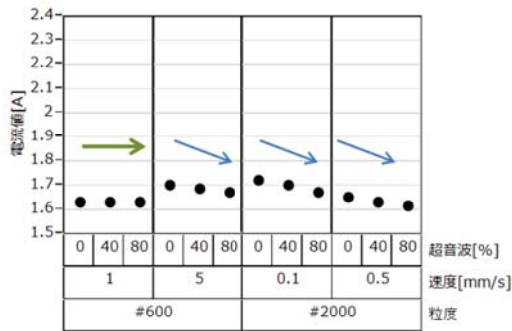
砥粒の粒度	#600, #1200, #2500
切断速度	1mm/s, 3mm/s, 5mm/s
超音波出力	0%, 40%, 80%

3. 実験結果および考察

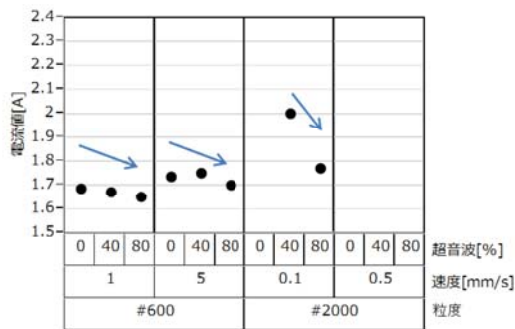
3.1 切断抵抗の低下と低ダメージ加工効果の評価

3.1.1 超音波援用による切断抵抗低下

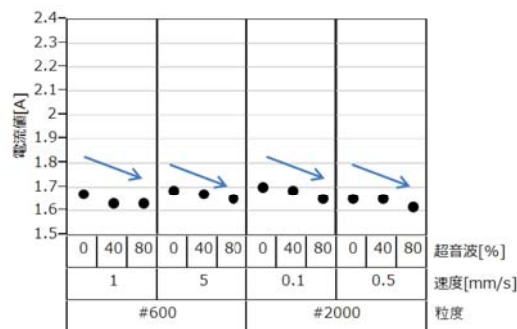
図 3 に供試試料を切断した際の最大電流値を粒度、切断速度、超音波出力の指標毎に示す。いずれの場合も、超音波を援用することで最大電流値は小さくなることがわかる。また、アルミナや窒化アルミの場合、粒度 #2000、切断速度 0.1mm/s、超音波無しの条件では最大電流値が急激に上昇して切断不可能であったが、超音波を援用することにより切断可能となった。さらに窒化アルミにおいては、超音波を援用することで、切断速度 0.5mm/s まで上昇させた場合も切断可能であった。これは、前述した超音波援用による破碎効果とクリーニング効果が適切に作用している結果と考えられる。



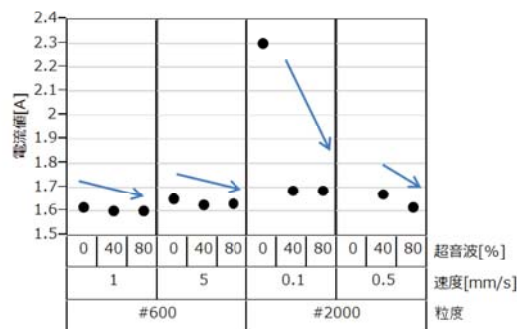
(a) 石英ガラス



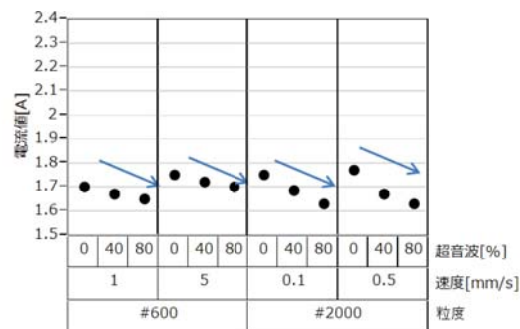
(b) アルミナ



(c) ジルコニア



(d) 窒化アルミ



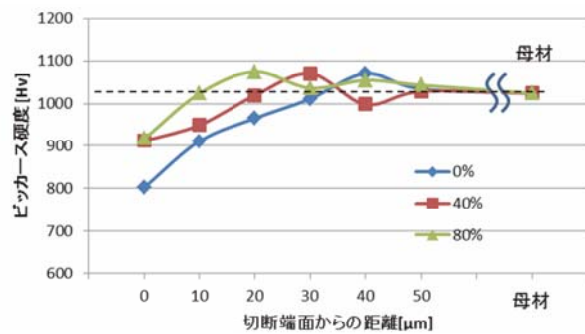
(e) 炭化ケイ素

図3 切断条件と最大電流値の関係

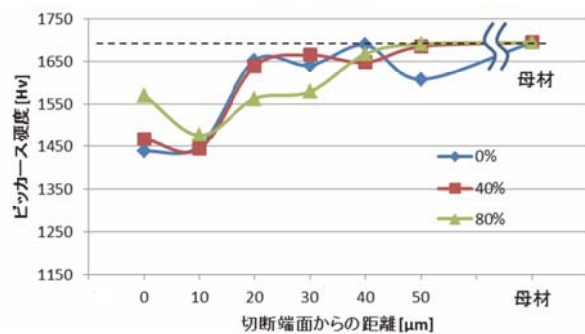
3.1.2 超音波援用による低ダメージ加工効果の評価

粒度#600, 切断速度 1mm/s の条件で切断を行った供試試料の切断端面からの距離とビッカース硬度の関係を図4に示す。石英ガラスでは端面からの距離約 30 μ m の箇所まで母材と同等な硬さとなり, 加工変質層は約 30 μ m であった。同様に, アルミナは約 40 μ m, ジルコニアは約 40 μ m, 窒化アルミは約 150 μ m, 炭化ケイ素は約 50 μ m の箇所にて母材と同等な硬さとなり, 加工変質層の範囲がわかった。これは, 試料の種類により, 加工変質層の厚さが異なることを意味する。また, 切断端面部では超音波を援用させた方が, 硬度の低下割合は小さくなり, 超音波を援用させることにより, 切断による母材組織への影響は小さくなることがわかった。これは切断面に発生するクラックが超音波を援用させることで, 微小クラックとなって発生するため, 硬度の低下域が狭くなったものと考えられる。

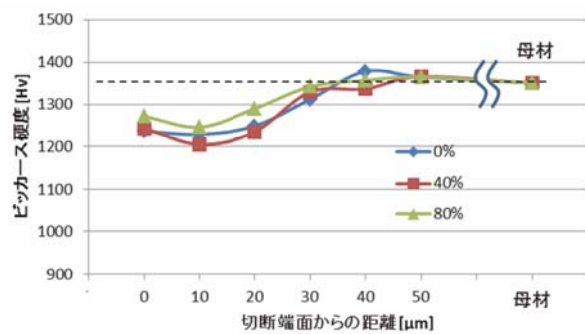
切断条件による切断端面からの距離とビッカース硬度の関係の代表例として石英ガラスの結果を図5に示す。図5(a)について, 超音波を援用することで硬度の低下量を抑えられ, 超音波出力 0%における硬度の低下が最も大きくなった。また, 硬度の低下域の範囲に関しても, 超音波出力 80%では切断端面から 10 μ m 以上の範囲で硬度が母材と同等になったことに対し, 超音波出力 40%では 20 μ m 以上で同等となり, さらに超音波出力 0%では 30 μ m 以上で同等となった。これは, 超音波を援用することにより, 切断面に形成された加工変質層の範囲がより小さくなったと考えられ, 切断面の低品質化を抑えることができたと考えられる。また, 図5(d)について, 超音波の援用無しでは硬度低下は大きい, 超音波援用により硬度低下を抑えることができおり, 超音波援用の有効性が示された。



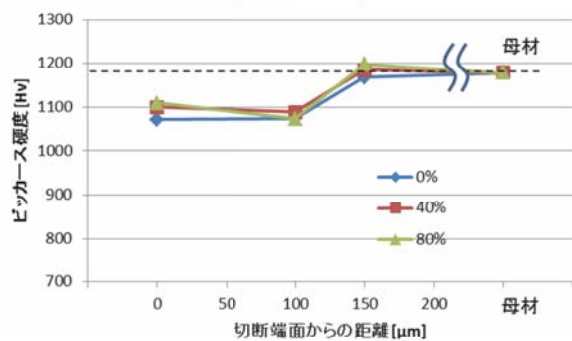
(a) 石英ガラス



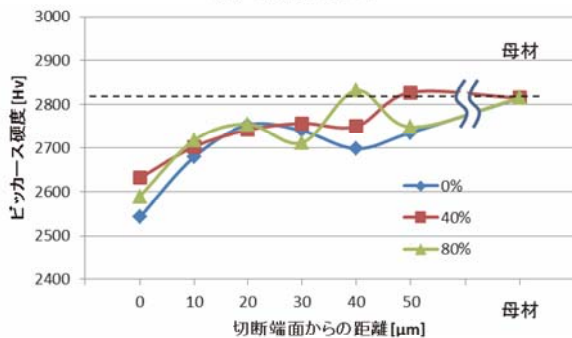
(b) アルミナ



(c) ジルコニア

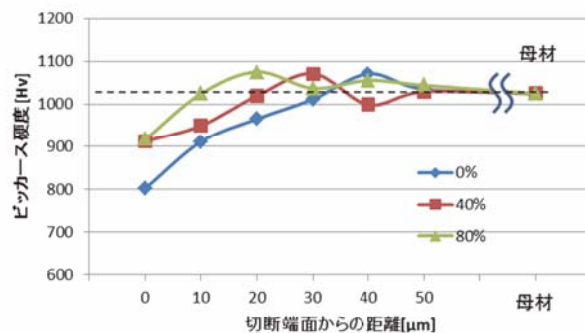


(d) 窒化アルミ

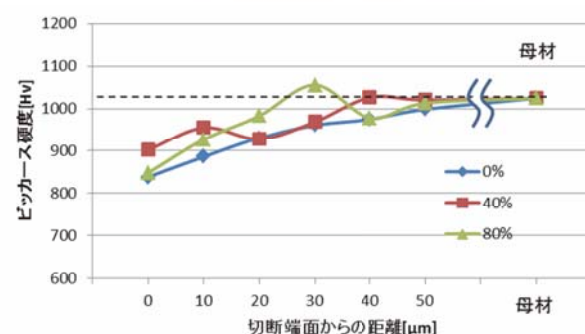


(e) 炭化ケイ素

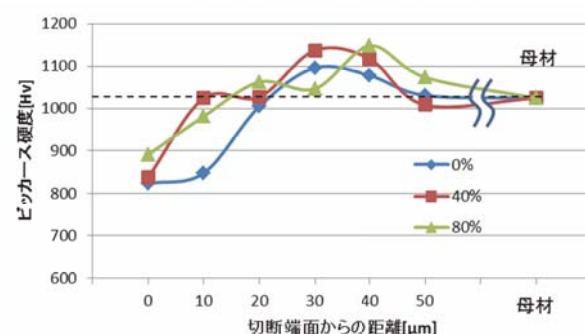
図4 切断端面からの距離とビッカース硬度の関係



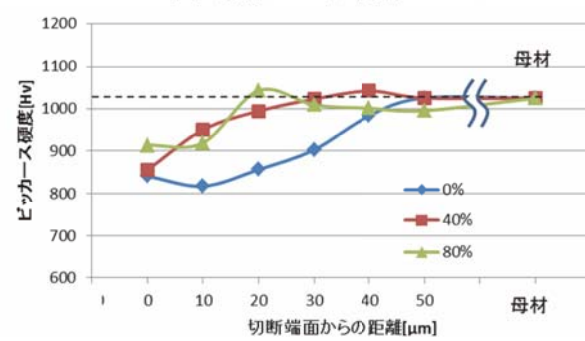
(a) 粒度#600, 速度 1mm/s



(b) 粒度#600, 速度 5mm/s



(c) 粒度#2000, 速度 0.1mm/s



(d) 粒度#2000, 速度 0.5mm/s

図5 石英ガラスにおける切断条件による切断端面からの距離とビッカース硬度の関係

3.2 超音波援用切断によるチッピング低減効果

3.2.1 表面チッピング

表面チッピングの傾向を図6に示す。なお、図6(b)について、人造サファイアは粒度#2500の条件において、切断抵抗の急激な上昇により切断不可能であったため、チッピングデータは未測定となった。粒度が細かいほど、表面チッピングサイズは小さくなり、切断速度が低速であるほど、表面チッピングサイズは小さくなることが確認された。超音波出力については、リチウムタンタレート

ト(図6(a))では超音波出力40%にて、表面チッピングサイズは最小となり、人造サファイア(図6(b))では、超音波出力が大きいほど、チッピングサイズが小さくなることが確認された。また、図7に表面チッピングの超音波援用効果の大きかった、人造サファイアの切断表面チッピング写真を示す。超音波出力0%に比べ、超音波出力80%にすることで、表面のチッピングサイズが小さくなることが確認された。

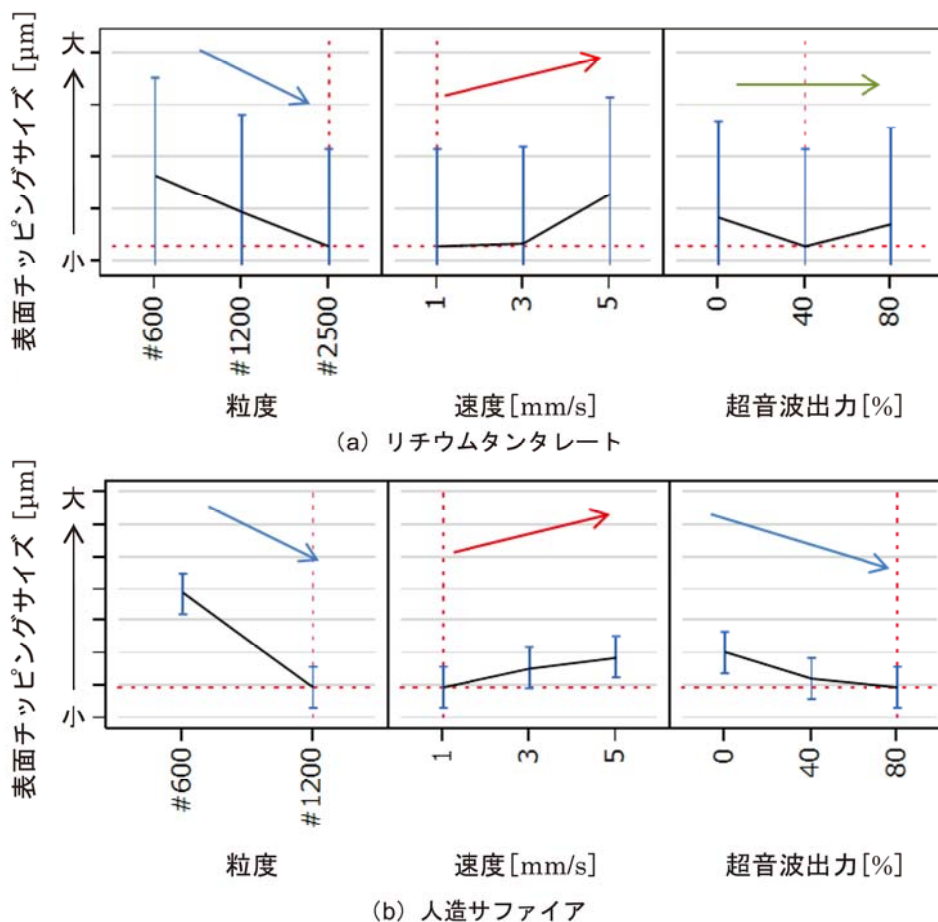


図6 表面チッピングの傾向

粒度	速度	超音波	表面写真
#1200	5mm/s	0%	
		40%	
		80%	

図7 表面チッピングの状態-人造サファイア(粒度#1200, 速度 5mm/s)

3.2.2 裏面チップング

裏面チップング傾向を図8に示す。図8(b)について、前述のとおり人造サファイアは粒度#2500において切断は不可能であったため、裏面チップングデータは未測定となっている。リチウムタンタレート（図8(a)）については、粒度を細かく、速度を低速、超音波出力を大きくすることで裏面チップングサイズの減少傾向が確認さ

れた。また、人造サファイア（図8(b)）についても、粒度を細かく、速度を低速、超音波出力を大きくすることで裏面チップングサイズの減少傾向が確認された。その代表例として図9に人造サファイアの切断裏面チップング写真を示す。超音波出力0%に比べ、超音波出力40%、80%にすることで、裏面のチップングサイズが小さくなることが確認された。

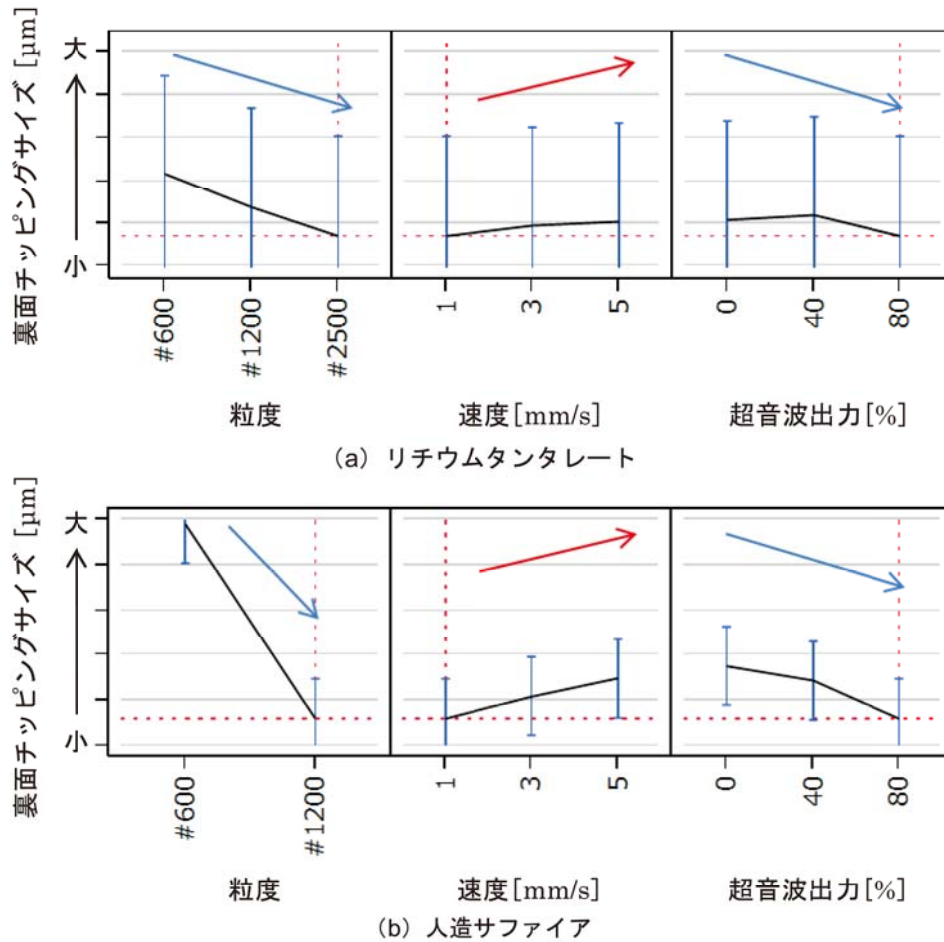


図8 裏面チップングの傾向

粒度	速度	超音波	表面写真
#1200	5mm/s	0%	
		40%	
		80%	

図9 裏面チップングの状態-人造サファイア(粒度#1200, 速度 5mm/s)

3.2.3 チッピングに関する考察

これらの評価結果から、超音波の有効性を考察するため、供試試料のビッカース硬度とヤング率の関係を検討した。ビッカース硬度とヤング率の関係を図10に示す。参考として、切断抵抗の低下と低ダメージ加工効果の評価を実施した石英ガラス、アルミナ、ジルコニア、窒化アルミおよび炭化ケイ素も図中に示す。また、一般的な半導体材料であるケイ素についても図中に示す。この結果から、超音波援用による切断抵抗低下と低ダメージ加工効果は、ほぼどの試料においても確認することができた。今回の評価結果から、ビッカース硬度が高く、ヤング率が高い試料で超音波援用によるチッピング低減の効果を得ることができた。表面チッピングの結果から、リチウムタンタレートでは超音波出力40%で表面チッピングが最も小さくなったことに対し、人造サファイアでは超音波出力80%で最も表面チッピングが小さくなった。リチウムタンタレートと人造サファイアではヤング率に差があり、人造サファイアのヤング率は大きいため、人造サファイアの方が切断する際に、より大きな衝撃力が必要となると考えられる。そのため、ヤング率の高い試料については高出力が必要であると考えられる。今回のような硬度が高い試料が、超音波援用の効果を得られる要因として、超音波援用を行わない通常の切断では与えられないハンマリング作用で、小さなマイクロクラックを発生させ切断をすることで、大きなクラックを抑制した切断を行うことが可能であると考えられる。また、リチウムタンタレートの表面チッピングは超音波出力に適切な値があり、低出力で表面チッピングサイズが最も小さくなったが、裏面チッピングは超音波出力が高い方が裏面チッピングサイズは小さくなった。よって、表面・裏面で超音波援用の効果は異なっており、表面チッピン

グより裏面チッピングへの効果の方が大きいと考えられる。これは、裏面チッピングの方が表面チッピングより切削屑の排出の影響を受けやすく、超音波援用による目詰まり防止効果が裏面チッピングで、より効果的に得られた結果と考えられる。

4. おわりに

本研究では、ファインセラミックスへの超音波援用切断が有効な効果を得られることを定量的に検討するため、石英ガラス、アルミナ、ジルコニア、窒化アルミおよび炭化ケイ素を用いて、切断時のモータ電流値および硬度の測定を行った。また、リチウムタンタレートおよび人造サファイアを用いて、チッピング低減効果の検証を行い、以下の結論を得た。

- (1) ファインセラミックスの切断において、超音波を援用させた場合、超音波を援用させない場合と比べ、切断抵抗を抑えた切断を行うことができた。また、その効果として、速度を上昇させた効率的な切断を行うことができた。
- (2) ファインセラミックスの切断における加工変質層の厚さは試料の種類によって異なり、超音波の援用によりその厚さを小さくすることができた。
- (3) 試料の種類によっては、超音波出力による硬度の変化割合が異なり、超音波出力が大きい方が硬度の低下が抑えられる傾向であった。
- (4) チッピング評価を行うことにより、超音波援用におけるチッピング低減の効果を確認することができた。また、チッピング評価における、超音波援用の有効性を得られる試料の特性傾向を、ビッカース硬度とヤング率の関係から特性値マップ上にて把握することができた。

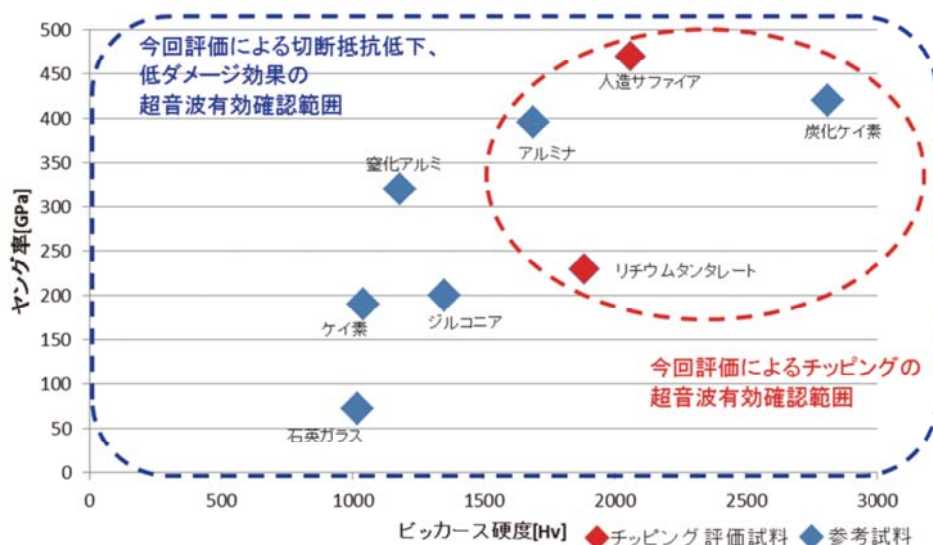


図10 ビッカース硬度とヤング率の関係

＜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教授、高田プラント建設の五島宏氏、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，pp.6-9，(2014)
- 2) 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
㈱高田工業所 装置事業部
装置技術グループ