

脆性材料のディスクング

河 合 伸 泰*・河 崎 充**

Disking of brittle materials by lateral pressure

Nobuyasu Kawai and Makoto Kawasaki

As for hard, brittle materials such as ceramics and glasses used for various electronic equipments and optical apparatuses, it is expensive in general to cut such materials, and it is a big problem to raise the material yield. The disking method is a cutting method that uses the tensile stress generated internally by putting high isostatic pressure to the side of these materials. The influence of and lubrication on cutting, and the cutting pressure and time was examined by using pyrex glass, fused silica, and polycrystal SiC in this experiment. It was found that lubrication between outer sleeve and materials and low cutting pressure are preferable to reduce the surface roughness of the cutting plane.

1. 緒言

各種の半導体装置に使われているセラミックやガラスなどの硬くて脆い材料は、近年のエレクトロニクス機器、光学機器の発展に伴い、年々その使用量が増加している。しかし、SiC を含めてその硬くて脆いという性質のため、切断方法が限られている。また硬質セラミック材料は一般に高価なものが多いため、材料歩留まりを良くすることは大きな課題である。そのためより効率的で歩留まりが高い側圧切断法やディスクング法（複数箇所同時切断法）が一つの解決手段になりうるのではとの期待からこれらの方法について研究を行った。

ディスクング法は切断材の側面に高压の等方圧を加えることにより、切断材内部に発生する応力を利用する切断法である。今回の実験でSiC 単結晶を入手して切断実験を行うことはSiC 単結晶が非常に高価な材料であること、単結晶の販売が制限されていることから、化学成分の異なる二種類のガラス棒およびSiC 多結晶を使用した。ノッチ傷からの切断を確認する、ノッチ付加荷重（ノッチの大きさ）、切断圧力および圧力保持（切断時間）の変化のディスクングへの影響について調べることを今回の実験の目的とした。

2. ディスクングの原理

ディスクングとは側圧切断法と同様に切断材の側面に圧力を加えることにより切断材に発生する内部応力を利用した切断法である¹⁾。図1にその加工原理を示す。外筒材中に入れられた切断材を圧力容器に挿入し、両端をシールし、その中央部から液体の圧力媒体を導入し、外筒材側部に高压の側圧（P）を加える。加える圧力は切断材の引張強さによって異なる。

過去の報告²⁾によれば、圧力の加えられた切断材には、その表面の半径方向と軸方向に圧縮応力が、また、中心部の軸方向には引張応力が発生する。その応力が切断材の引張強さ以上になると切断材は破断する。ディスクングの場合は側圧切断法と同様に切断材の表面近傍に圧縮応力、内部に引張応力が発生するが、それに加えて切断材よりも縦弾性係数の小さい外筒材が圧力によって軸方向へより大きく伸びようとするので引張応力が加算される。また、側圧切断法では切断材が切断されるとその切断された隙間に圧力媒体が流れ込み、圧力が低下するので1箇所での切断しかできないが、ディスクング法を用いれば切断材

* 機械工学科 ** 機械工学専攻(現 日立粉末冶金株)

が1箇所でも切断しても圧力は保存されたままであるため、さらに切断が進行し、1度に多数個の切断が可能である。切断材の最小切断幅については切断片が外周からの圧力によって座屈しない範囲まで可能ということで理論的解析がなされている³⁾が、切断材の外径の0.02程度の幅寸法までしか側圧切断またはディスクングすることができない。直径を50mmとすれば約1mm厚さとなる。シーリング法やシーリング機構による制限、さらに安定的な切断を考えると最小切断幅は現在1mmが限界であると考えられている。この数字はウェーハの厚みとしては物足りない。座屈を防ぐ何らかの方法を考えなければならない。

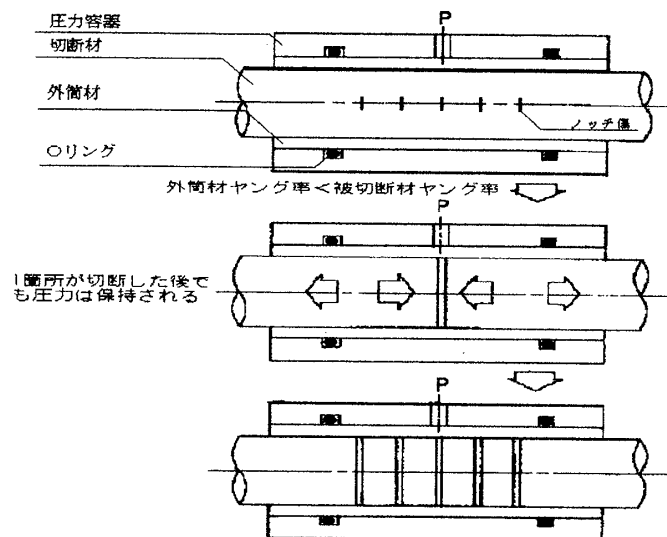


図1 ディスキングの原理

3. 実験方法

3.1 供試材

本実験ではφ12mm×45mmのパイレックスガラス、石英ガラスとφ12mm×50mmの多結晶SiCを使用し、実験を行った。パイレックスガラス、石英ガラスの化学成分を表1、多結晶SiCの化学成分を表2、結晶型を表3に示す。

表1 供試材の化学成分

供試材の種類	化学成分 (%)				
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
PX ガラス*	80.5	12.9	2.2	3.8	0.4
石英ガラス	100	—	—	—	—

*PX ガラス：パイレックスガラス

パイレックスガラスは硬質ガラスの一種で、SiO₂、B₂O₃を主成分とし、Na₂O、Al₂O₃のほか少量のK₂O、アルカリ土類酸化物を含むガラスである。石英ガラスの主成分は、ほとんど100%SiO₂である。

表2 多結晶SiCの成分

供試材の種類	化学成分 (ppm)						
	Al	Ca	Cu	Fe	Ti	B	C
多結晶SiC	360	130	20	180	60	焼結助剤	

表3 多結晶SiCの結晶型

結晶多形	六方晶		菱面体晶
	4H	6H	15R
%	22	75	3

この表 3 に示した 4H、6H とは六方晶で 4 および 6 原子周期の構造、15R は菱面体晶で 15 原子周期構造である。(Ramsdell 表記法)

また、外筒材は以下のような組み合わせでアクリル樹脂、アルミニウムを使用した。

パイレックスガラス・・・アクリル樹脂パイプ(φ16mm×φ12mm×45mm)

石英ガラス・・・・・・アクリル樹脂パイプ(φ16mm×φ12mm×45mm)

多結晶 SiC・・・・・・アルミニウムパイプ(φ16mm×φ12mm×50mm)

3.2 切断用高压容器

実験に使用した高压容器は原の解説⁴⁾を基に研究室で設計し、光高压機器(株)に製作を依頼した。その外観を写真 1 に示す。また、その断面図を図 2 に示す。

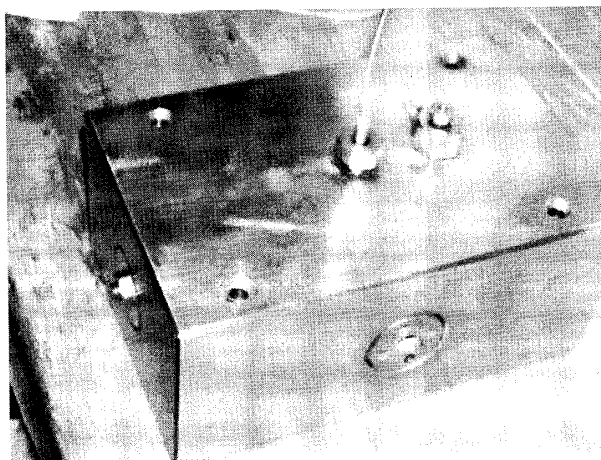


写真 1 側圧切断用高压容器

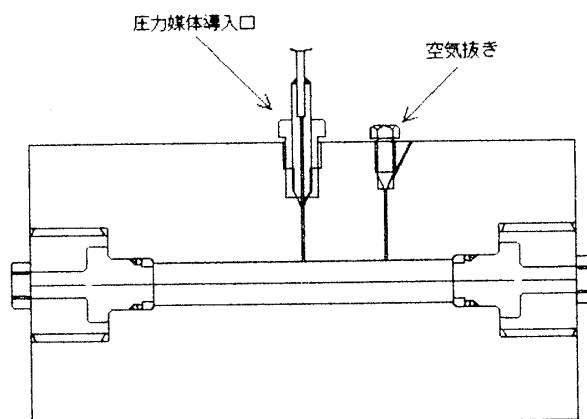


図 2 高压容器断面図

3.3 圧力媒体

本実験では、粘度が低く、腐食性が無く、入手しやすく取り扱いやすい灯油を圧力媒体に使用した。また、最高 1000MPa まで可能な手動式ポンプを使用して昇圧した。

3.4 切断条件

3.4.1 ノッチ付加条件

ノッチ付加荷重は側圧切断の実験結果⁵⁾で最適と判断した 1000g を使用した。また、ノッチ傷間隔の変化によってディスクングに影響があるかどうかを調べるために、3 種類のノッチ傷間隔を試した。多結晶 SiC にはダイヤモンド圧子でノッチ傷を付けることができなかったため、ノッチ傷なしで実験を行った。

- ・ 圧子形状・・・・・・斧型圧子(先端角 45°)
- ・ ノッチ付加荷重・・・・微小ビッカース硬度計 1000 g
- ・ ノッチ傷寸法・・・・450 μm～600 μm 前後
- ・ ノッチ傷間隔・・・・潤滑なし 2mm、1mm、ノッチ傷無し
潤滑あり* 2mm、ノッチ傷無し

*: 外筒材内面と切断材外面の間の摩擦力を減少させるために TOYOTA MP GREASE NO. 2*を用いた。

写真 2 にノッチ付加に使用したダイヤモンド圧子の先端を正面から見た状態、写真 3 に横から見た状態を示す。

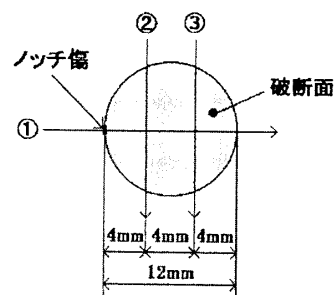
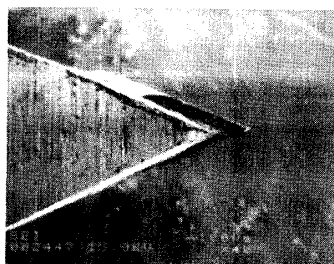
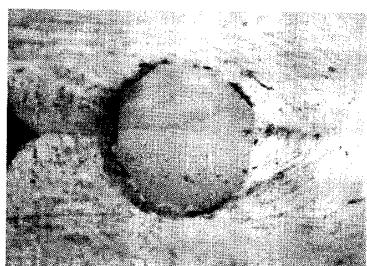


写真2 圧子先端の正面像 写真3 圧子先端の横像 図3 表面粗さの測定場所

3.4.2 切断圧力条件

側圧切断の結果に基づきパイレックスガラス、石英ガラスは圧力を 40MPa から 10MPa ずつ上げていき 80MPa までの切断実験を行った。多結晶 SiC では 260MPa と 300MPa の圧力を使った。

ガラス・・・潤滑なし	40MPa・50MPa・60MPa・70MPa・80MPa
潤滑あり	50MPa・60MPa・70MPa・80MPa
多結晶 SiC・・・潤滑なし	260MPa
潤滑あり	300MPa

3.5 評価方法

切断表面の粗さをレーザ変位計を使って計測した。測定場所を図3に示す。測定場所は、ノッチ傷と丸棒の中心を通る①および①に直角な②、③の3箇所である。

4. 実験結果

4.1 圧力とノッチ傷間隔のディスクングへの影響

外筒材とワークの間の潤滑をなしにした場合の切断圧力の変化による切断箇所数を表4に示す。また、ノッチ傷の有無によって切断数を比較すると、ノッチ傷がある方が同じ圧力下では切断された枚数が多い。また、ノッチ傷間隔 2mm と 1mm を比較すると 1mm の方が切断数は多い。

表4 圧力変化による切断数への影響（潤滑なし）
(切断数)

	圧力 (MPa)				
	40	50	60	70	80
PX 2mm (9ヶ所)	0	4	10	9	13
石英 2mm (9ヶ所)	0	7	8	13	15
PX 1mm (19ヶ所)	1	4	12	12	18
石英 1mm (19ヶ所)	0	8	15	13	13
PX 無	1	0	0	13	15
石英 無	0	0	0	11	13

表4から、いずれのノッチ付加条件でも圧力が高い方が切断数も増えていく傾向にあることがわかる。また、ノッチ傷無しでは低圧側で切断数が少なく、高圧側ではノッチ傷有りとその切断数に差がなくなるので、低圧ではノッチ有無の影響があると言える。

ディスクングで複数箇所を切断する場合は、表4から明らかなように一箇所目を切断するときの圧力に

比べ、二箇所目以降の切断を行うにはそれ以上の圧力が必要であることから、切断を複数箇所で行い、切断幅が小さくなっていくにつれて切断に必要な圧力が上昇することがわかる。

また、石英ガラスとパイレックスガラスの切断圧力に顕著な差は現れなかった。

4.2 切断圧力の切断面粗さへの影響

表面粗さ曲線から表面凹凸（最大値－最小値）を計算し、パイレックスガラスの値を表 5、石英ガラスの値を表 6 にまとめて示す。①、②は測定場所である。

表 5 パイレックスガラスの表面凹凸（潤滑なし）

	ノッチ 傷間隔	圧力 (MPa)	表面凹凸(μm)	
			①	②
P X	2 mm	80	487.5	302.9
		70	593.5	315.5
		60	498.6	463.0
		50	—	—
	1 mm	80	576.4	253.1
		70	—	—
		60	188.3	210.6
		50	36.3	90.9
	無し	80	355.4	343.5
		70	207.6	501.9
		60	—	—
		50	16.3	87.0

表 6 石英ガラスの表面凹凸（潤滑なし）

	間隔	圧力 (MPa)	表面凹凸(μm)	
			①	②
石 英	2 mm	80	79.6	314.9
		70	208.6	310.8
		60	184.1	127.8
		50	333.9	328.5
	1 mm	80	718.9	187.9
		70	534.5	200.2
		60	106.0	142.8
		50	718.5	407.7
	無し	80	546.6	371.4
		70	384.8	428.3
		60	597.4	376.0
		50	—	—

値にばらつきはあるものの測定場所①②とも、50MPa～60MPa の低い圧力では他の高圧力 70～80MPa よりも面粗度が小さい傾向にあることがわかる。また、これらの表面凹凸の数値はワイヤーカットの数値に比べて非常に大きい、その理由は切断面周辺で大きなうねりがあるためであり、中心に近い部分の表面凹凸は 20 μm 以下に抑えられている。この場合外筒材と切断材の間に潤滑剤を使用していないが、発生する引張応力は表面につけたノッチ傷から破断させるのに役立つと考えていたが、切断面の表面粗さ、とくに周辺部の粗さを悪くする結果となり、表面には引張応力がかかっていない状態で切断の方がよい結果をもたらすことがわかった。ディスクングでは、側圧切断のときと違いパイレックスガラスと石英ガラスの表面粗さにそれほど大きな差はあらわれなかった。

また、測定場所による表面粗さの差としては①の場所が最も粗く、②と③の両者は同じような値で①より凹凸が小さい。

4.3 潤滑の切断数、表面粗さへの影響

潤滑をした場合の切断圧力とノッチ傷間隔の違いがディスクング切断数に及ぼす影響を表 7 に示す。

表 4 と表 7 を比べてみると、切断圧力とノッチ傷間隔が同じ場合では潤滑をしていない時の方が切断箇所は多くなっている。この結果から、潤滑しない場合は側圧を加え外筒材が軸方向へ伸ることによりガラス表面に引張力が働いて切断数が多くなったと考えられる。

表7 圧力変化による切断数への影響（潤滑あり）
（切断数）

	圧力 (MPa)			
	50	60	70	80
PX 2mm (9ヶ所)	3	7	6	10
石英 2mm (9ヶ所)	5	5	8	8
PX 無	0	1	1	3
石英 無	0	0	2	5

次に、潤滑をした場合のパイレックスガラスと石英ガラスの表面凹凸の値をそれぞれ表8と表9に示す。

表8 パイレックスガラスの表面凹凸（潤滑あり）

	ノッチ傷間隔	圧力 (MPa)	表面凹凸 (μm)	
			①	②
P X	2mm	80	136.0	89.8
		70	152.5	104.9
		60	139.9	96.7
		50	73.2	28.2
	無し	80	221.0	58.4
		70	194.9	96.3
		60	142.4	131.9
		50	—	—

表9 石英ガラスの表面凹凸

	ノッチ傷間隔	圧力 (MPa)	表面凹凸 (μm)	
			①	②
石英	2mm	80	261.9	63.5
		70	200.6	111.0
		60	44.0	15.3
		50	117.8	64.2
	無し	80	150.9	81.6
		70	258.1	102.4
		60	—	—
		50	—	—

表8、9と表5、6を比較すると、潤滑をした場合は切断面の表面粗さが小さくなっていることがわかる。ディスクキングを行うときは外筒材からの引張力は受けられなくなるが、潤滑をした方が良いといえる。とくに、ノッチ傷を付けているときは、潤滑をしていない場合はノッチ傷以外から切断されている部分もあったが、潤滑をした場合はノッチ傷でのみ切断が起こるという利点がある。

この表面凹凸の大きさはワイヤーソーによる切断のそれよりも依然大きい値である。この場合も潤滑無

しと同様に切断面周辺部でのうねりに伴うもので、中心部での凹凸は潤滑無しと同様に $20\mu\text{m}$ 以下に収まっている。ディスクング技術を半導体用単結晶の切断に利用するにはこの周辺うねりを抑えることが必要である。

写真 4 に潤滑剤を使用したディスクング切断材の外観を示す。右側の写真で方眼紙の線が歪まずに透過して見えていることがわかる。



写真 4 ノッチ傷から正確に切断されたガラス

4.4 多結晶 SiC

4.4.1 表面粗さ

多結晶 SiC をディスクング切断する場合の潤滑の有無による表面粗さ曲線と表面凹凸の数値をそれぞれ図 4、表 10 に示す。

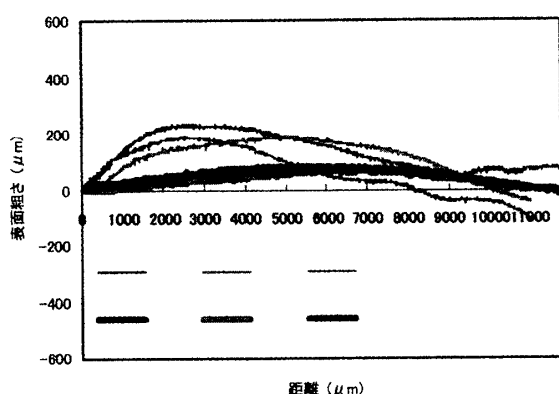


表 10 多結晶 SiC の表面凹凸

	潤滑	圧力 (MPa)	表面凹凸 (μm)	
多結晶 SiC	あり	300MP a	①	100.6
			②	86.2
			③	79.0
	なし	260MP a	①	239.2
			②	238.7
			③	307.8

図 4 多結晶 SiC の表面粗さ

これらの図、表より、ガラス材料の切断と同様に、潤滑をした方が表面はより平滑になり表面凹凸が小さくなる結果となった。潤滑剤を用いた場合でも表面凹凸はワイヤーソーのそれよりはるかに大きい値⁶⁾となっている。図 4 に見られるように破断面はゆるやかな凹凸面をしており、周辺うねりは見られないものの、この凹凸の原因を究明しなければ、良好な破断面は得られない。局所的に見た凹凸の山谷の差は $10\mu\text{m}$ 程度である。単結晶 SiC はへき開面、(0001) 面が切断材の軸方向に直角であり、多結晶のようなうねりは出にくいと思われるので、良い結果が得られると思われる。

4.4.2 残留応力

破断面上の残留応力測定位置は図 5 に示すように表面粗さ測定線①上のノッチ傷に近い方から順に 1、2、3、4 の 4 箇所とし、残留応力を X 線残留応力測定装置により調べた結果を表 11 に示す。

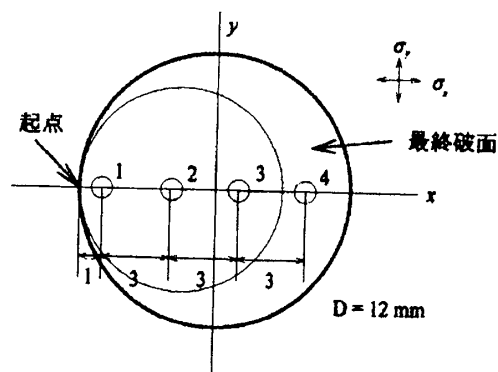


図5 残留応力測定位置

表 11 測定結果

(単位 MPa)

位置	1	2	3	4
σ_x	-60.2	-14.4	13.9	-34.6
σ_y	-22.2	-33.6	-49.2	-49.1

表 11 から σ_x で破面進行方向に残留応力の勾配が認められる。特に、位置 1 の起点近傍や位置 4 の破面が粗い最終破断部分に高い圧縮の残留応力が認められる。これは、SiC 多結晶の切断に必要な圧力よりも高い圧力を加えて切断したことが原因と考えられるので、より低い圧力で切断を行えば残留応力も低下すると考えられる。

5. 結言

- ・ 切断圧力が高いほど切断箇所は増えるが、パイレックスガラスと石英ガラスでは、切断圧力にあまり差は認められない。
- ・ 低い切断圧力により表面凹凸が小さい破面が得られる。しかし、ワイヤーソーでの切断面の表面粗さよりも大きな値であった。
- ・ 切断材と外筒材の接触面を潤滑することによって、ノッチ傷のみでの切断が可能となり、また表面粗さも良くなる。
- ・ ディスキングにより切断された多結晶 SiC の残留応力は比較的小さく、破壊起点や最終破断部近傍では圧縮応力がやや大きかった。また、破断面の表面粗さはワイヤーソーのそれよりも大きかった。

参考文献

- 1) 佐藤和郎：切断の魔術、裳華房(1993)、p. 100
- 2) 野村泰雄、耕作哲幸、鹿野道雄：不二越技報 vol. 43(1987), no. 2, p. 59
- 3) 和田重伸、吉井誠一、石川通夫：昭和 58 年度精機学会秋季大会学術講演会論文集、p. 587
- 4) 原 公彦：超高圧有機合成(1999)第 2 章、p. 23
- 5) 速水醇一：福井工業大学「ハイテク・リサーチ・センター」整備事業研究成果報告書(平成 17 年 3 月)、p. 221
- 6) 河合伸泰、後藤 徹、脇浜 智：福井工業大学研究紀要、第 33 号(2003)、p. 111

(平成 20 年 3 月 31 日受理)