

## 本講義資料のご利用にあたって

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。

著作権が東京大学の教員等に帰属する著作物については、非営利かつ教育的な目的に限り再利用することができます。

ご利用にあたっては、以下のクレジットを明記してください。

クレジット:

UTokyo Online Education ファインマシニング 2021 杉田 直彦





# 硬脆材料の切削技術

ガラス、セラミックス等の硬脆材料の切削における特性について説明し、高品位・高能率化にむけた加工技術を紹介する。

2021年10月13日

杉田直彦

## 1. 各種材料の基礎と切削方法

### 1.1 各種材料の特徴

- ・ セラミックス
- ・ ガラス
- ・ 複合材料

### 1.2 マイクロ切削

## 2. 研究からみた硬脆材料の加工

### 2.1 セラミックスの熱援用加工

### 2.2 ガラスのレーザ援用加工

### 2.3 CFRPの加工



# 目覚まし質問

Q. そろそろ就活を始めるとしていますが，聞いてみたいことはありますか？

参考：主な工作機械メーカーの分布



# 本日の構成

## 1. 各種材料の基礎と切削方法

### 1.1 各種材料の特徴

- ・ セラミックス
- ・ ガラス
- ・ 複合材料

### 1.2 マイクロ切削

## 2. 研究からみた硬脆材料の加工

### 2.1 セラミックスの熱援用加工

### 2.2 ガラスのレーザ援用加工

### 2.3 CFRPの加工



# 各種加工法の分類

	機械的エネルギー	熱的エネルギー	電気・化学的エネルギー
除去加工 重量減	[機械的破壊(延性, 脆性)] 切削加工 研削加工 切断加工  砥粒加工 { ホーニング 超仕上 ラッピング 超音波加工 バレル加工 噴射加工 ベルト加工	[熱的破壊(溶融, 蒸発)] 放電加工 レーザー加工 電子ビーム加工 イオンビーム加工 プラズマ加工	[電気・化学的破壊(分解)] 電解加工 電解研磨 化学研磨 エッチング
変形加工	[機械的変形(塑性変形)] 塑性加工 { 鍛造 圧延 プレス加工 引抜き加工 押出し加工	[熱的変形] 鑄造 粉体成形(焼結)	
結合加工 重量増	[機械的結合] 機械的締結 焼ばめ 圧接	[熱的結合] 熱溶融結合 { ガス溶接 レーザー溶接 電子ビーム プラズマ溶射	[電気・化学的結合] 拡散接合 コーティング { PVD CVD めっき

Q. 知っているセラミックスを挙げてみて

加工機構には、塑性変形、破壊、物理・化学的反応などがある。除去加工は、不必要部分を除去して新生面を創成する加工法であるから、破壊現象である。

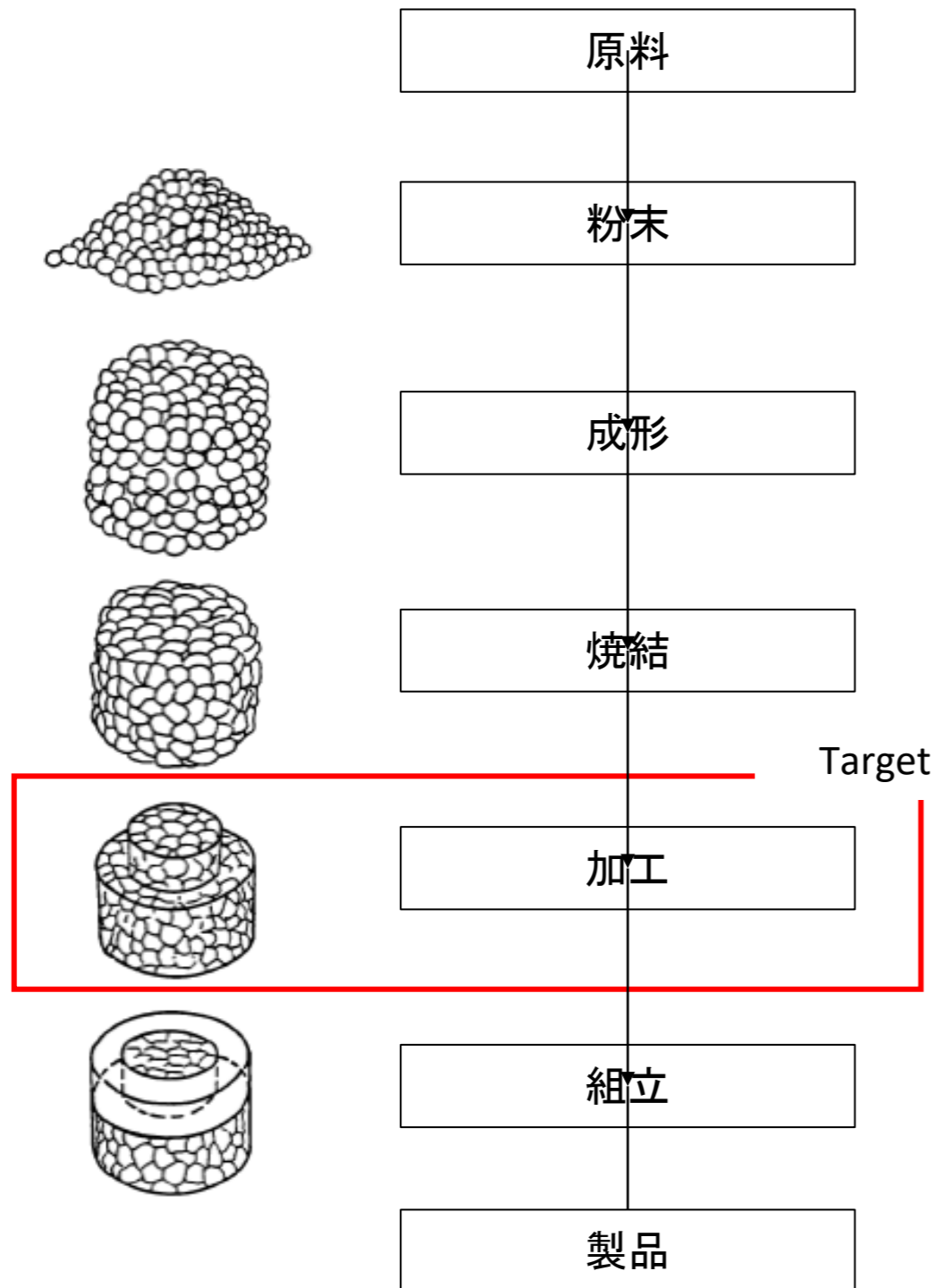
Q. セラミックスの特徴は？



加工が困難な難削材



# セラミックスの特徴



加工は、セラミックスが持つ「硬さ」と「脆さ」に特徴づけられる。

塑性変形による応力緩和が期待できず、通常は、脆性的な不安定破壊を起こす。き裂状の欠陥は強度低下の要因となる。線形破壊力学の導入が必要となる。

加工における欠点。工具損耗が激しく、コスト増の要因となる。



# セラミックスの製造

## (1) 常温加圧成形 (Cold press, CP)

常温で粉末を加圧成形し、その後高温で焼結する。常温での成形なので、粉末相互の接触が不十分となりやすく、強さはさほど高くない

## (2) 高温加圧成形 (Hot press, HP)

焼結温度にて1軸方向に加圧する。加圧と焼結を同時に行う。緻密に成形されるため、高強度の焼結体を得ることができる

## (3) 熱間静水圧成形

(Hot isostatic pressing, HIP)

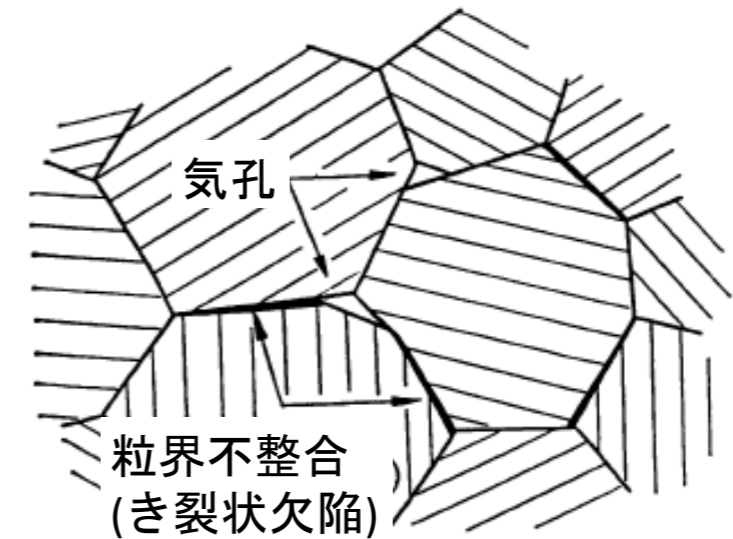
高温の静水圧下で加圧と焼結を同時に行う。等方加圧であるため、非常に均質であり、強さも改善される。

## (4) 反応焼結成形

(Reaction sintering, RS)

窒化珪素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )の製造で、Siを高温の窒素雰囲気中で窒化させ、同時に焼結する。複雑な形状のものを作ることができる

Q. 左の製法で強度の順番は？



<欠陥>

焼結時の結晶粒の揃い方、向き方、隣接結晶粒との接触の仕方によって気孔を生じたり、粒界にわずかの食い違い（粒界不整合）を生じやすい。このような欠陥は、強度に影響し、焼結法によって出方が変わる。



# セラミックスの密度と強度

- ・セラミックスの密度は，焼結時に生じる気孔と密接な関係がある．
- ・気孔とワーグ強度の関係を測定した関係式 (Duckworth)

$$S_d = Ae^{-\alpha P}$$

$S_d$  : 強度,  $P$  : 気孔率,  $A, \alpha$  : 係数

$A, \alpha$  は粒径に依存する．

$\text{Al}_2\text{O}_3$  (Passmoreら)の結果,

(1) 粒径  $2.2 \mu\text{m}$

$A : 634\text{MPa}, \alpha : 9.35$

(2) 粒径  $30 \mu\text{m}$

$A : 127\text{MPa}, \alpha : 0.34$

Q. これから分かることは？

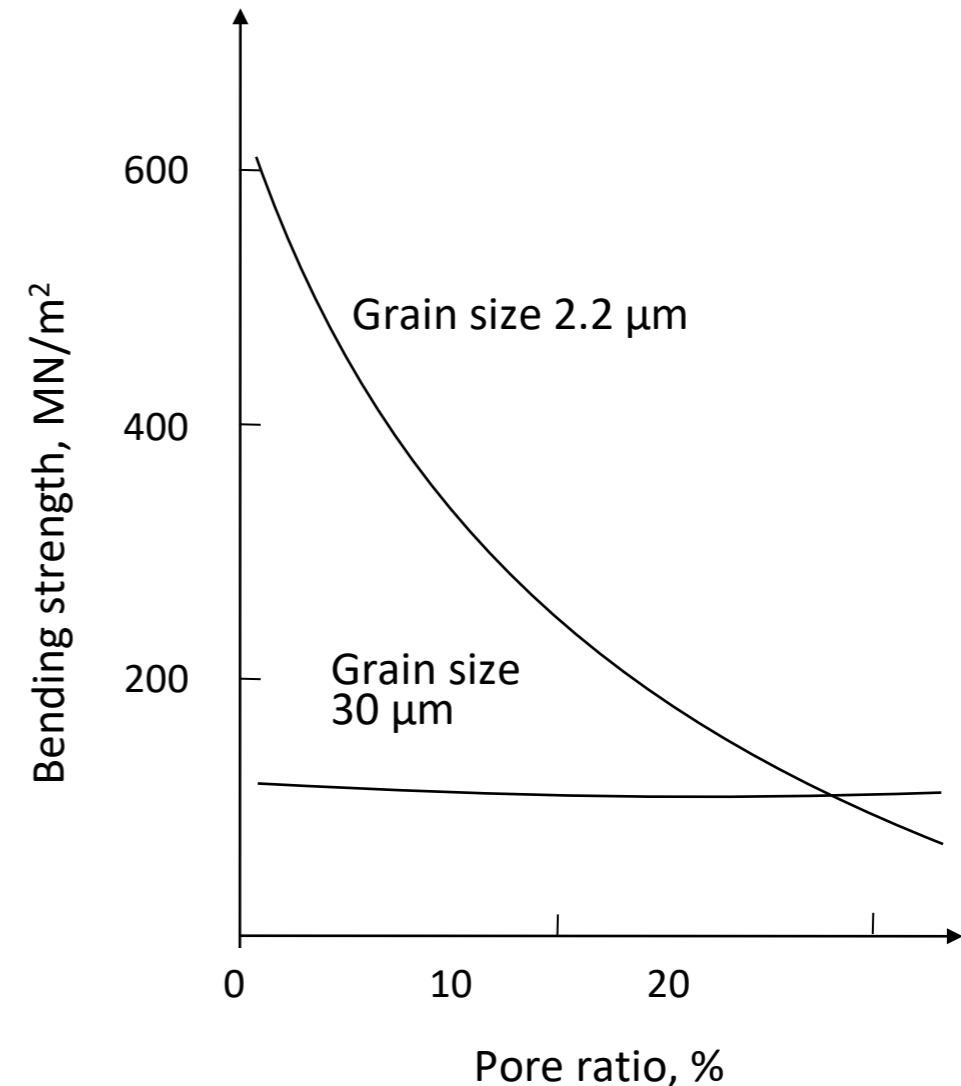


図. アルミナの気孔率と強度の関係 (Passmore)



# セラミックスの緻密化

緻密化が進むと、き裂欠陥の減少、き裂長さの減少して強度が改善される

脆性破壊：

ひずみエネルギーの解放と新生き裂面を形成するために必要なエネルギーが等しくなったときに破壊が生じる (Griffith)

薄い平板が面内(xy平面)の荷重を受ける状態, z方向の応力を0とする

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (\text{平面応力状態})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)a}} \quad (\text{平面ひずみ状態})$$

厚い物体が, z方向の厚さ方向に沿って一様な荷重を受けるような状態, z方向の歪みを0とする

$\sigma$  : 破壊応力,  $\gamma$  : 表面エネルギー,  $a$  : き裂長さ,  $E$  : ヤング率,  $\nu$  : ポアソン比

Q. き裂が伝播すると  $a, \sigma$  はどうなる？

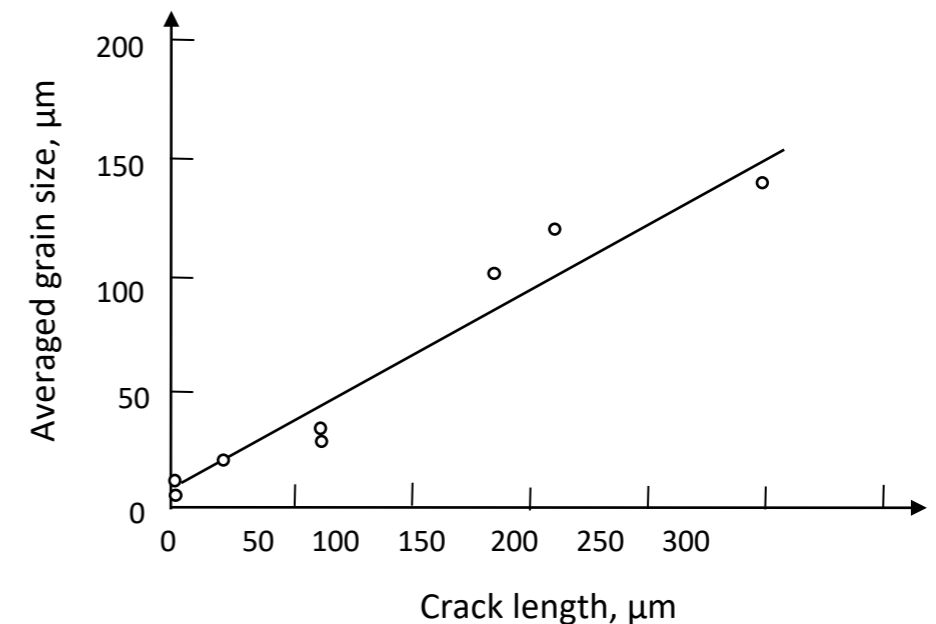


図. TiO<sub>2</sub>焼結体の粒径と先なき裂長さの関係 (Kirchner)

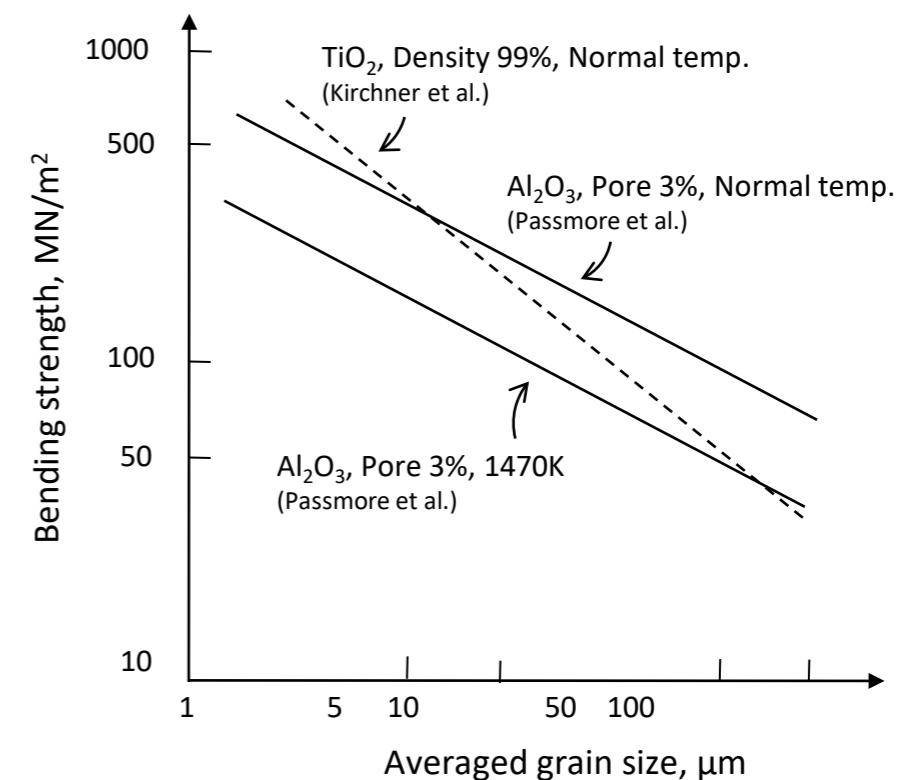


図. セラミックスの粒径と強さ



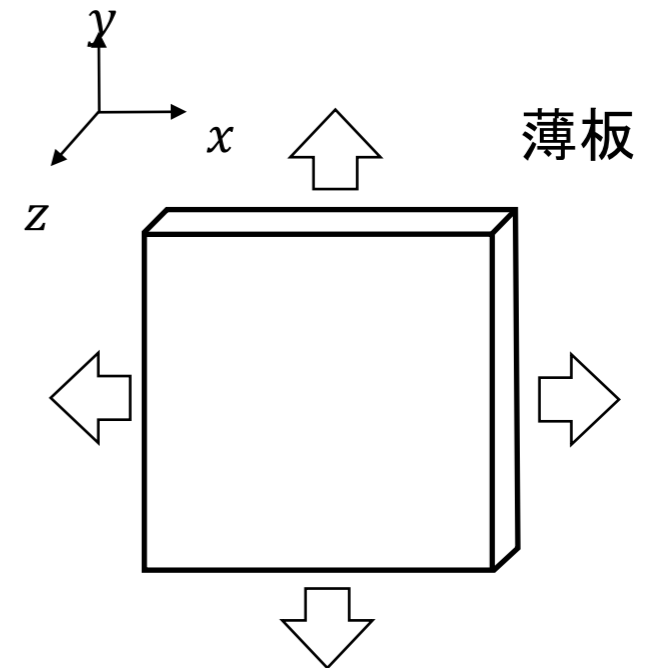
# (補足)平面応力状態と平面ひずみ状態

## 1. 平面応力状態

**仮定** : z軸方向の力が無視できる

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{ひずみは生じる}$$

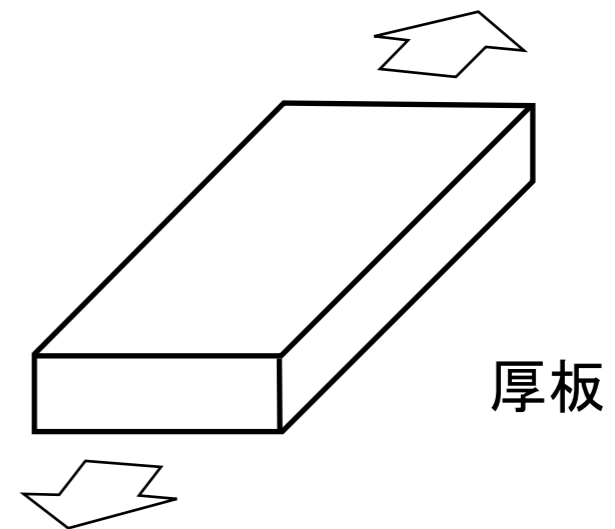


## 2. 平面ひずみ状態

**仮定** : z軸方向の変形が無視できる

$$\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$$

$$\sigma_z = -\nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad \text{応力は生じる}$$



# 粒径,気孔率と強さの関係

粒径と強さの関係は, 一般に次式で示される.

$$S_g = \underbrace{B}_{\text{単一粒の強さ}} \cdot \underbrace{G^{-b}}_{\text{粒径}} \quad \text{粒径指数}$$

$b$  は, 組成, 測定条件によって  $-1$  から  $-\frac{1}{8}$  の値を取るが, 粒径とき裂長さが等しいときは,  $-\frac{1}{2}$  となる.

Knudsen は気孔率と粒径を考慮した次式を示した

$$S = C \cdot e^{-\alpha P} \cdot G^b \quad G: \text{粒径}, C: \text{定数} \quad P: \text{気孔率}, \alpha: \text{係数}$$

アルミナの焼結体について  $25^\circ\text{C}$  と  $1200^\circ\text{C}$  における実験式(Passmore)は,

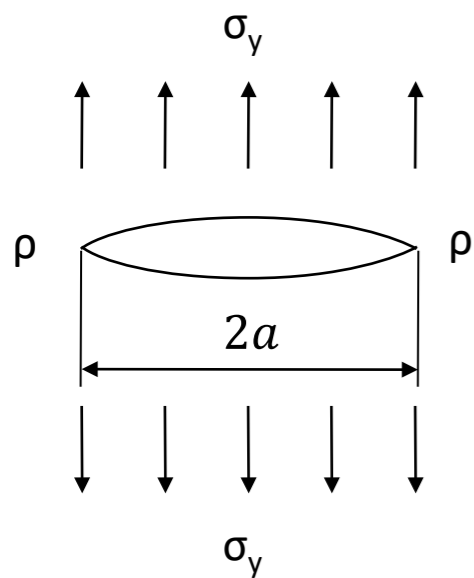
$$S_{25} = 142500 \cdot e^{-11.33P} \cdot G^{-0.60+3.33P}$$

$$S_{1200} = 73000 \cdot e^{-11.33P} \cdot G^{-0.60+3.33P}$$

で得られている.



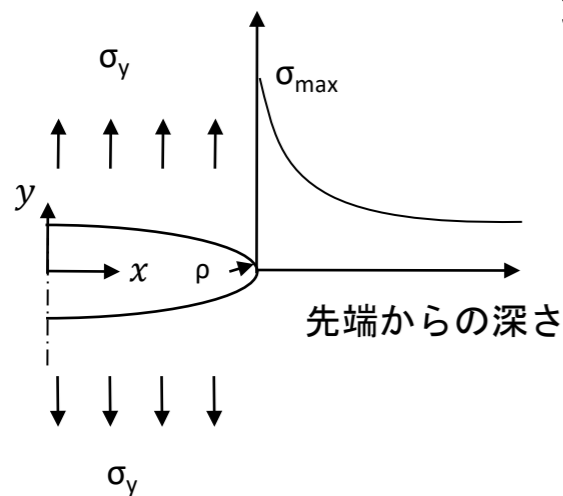
# き裂と強さ



先在欠陥（気孔，粒界不整合）が焼結体の中に存在し，応力集中を生じて見かけよりも大きな応力が発生する。

き裂の先端はある有限の曲率をもっており，それを  $\rho$  とする

最大応力  $\sigma_{max}$  はき裂の先端で発生する。



$$\sigma_{max} = \sigma_y \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$$

$$= \beta \sigma_y$$

応力集中係数

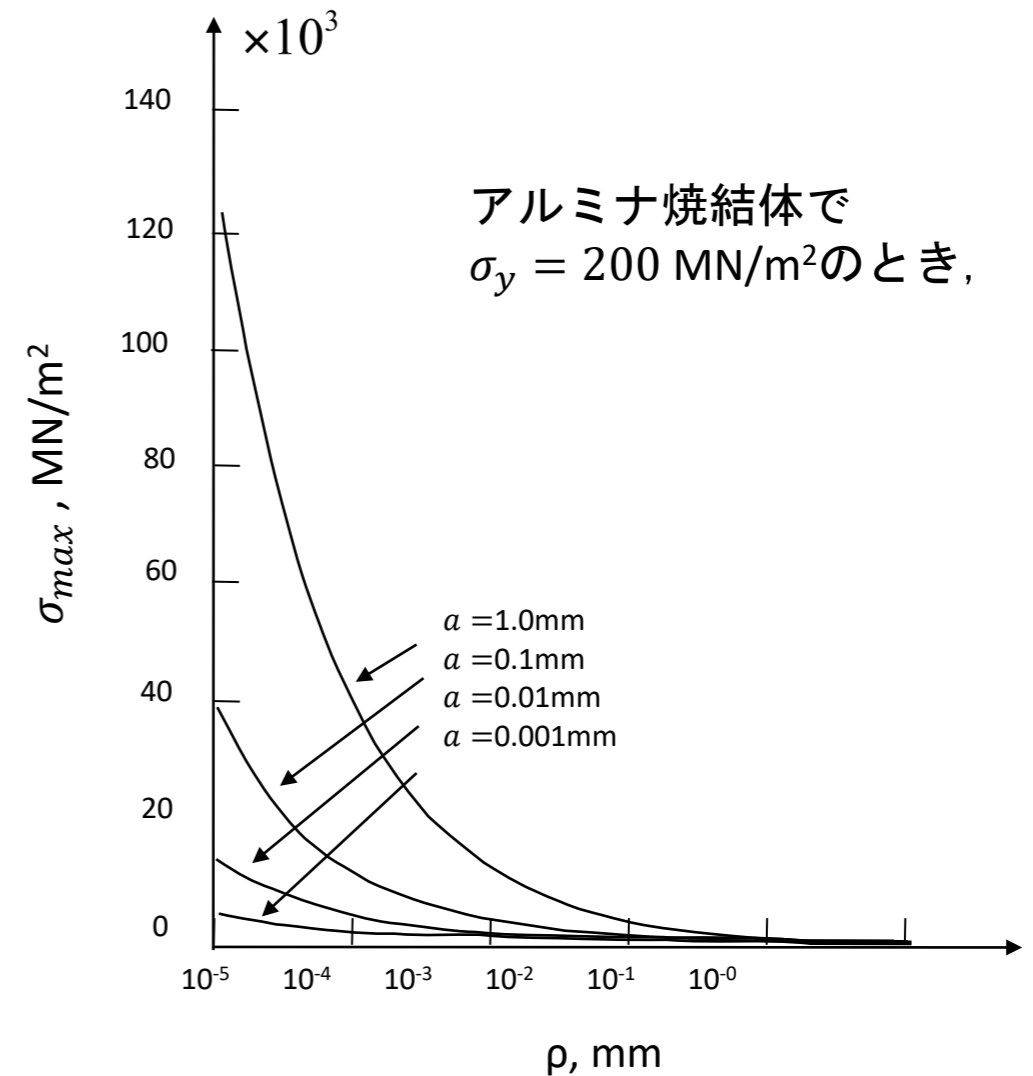


図. き裂先端曲率と最大応力の関係

Q. き裂が長くなると  $\sigma_{max}$  はどうなる？



- 応力集中を生じやすい形状を設計してはならない
- 多孔質体のように内部にき裂状欠陥を多く含んだものが低いエネルギーで加工できる

十分大きな平板の内部に  $2a$  の長さのき裂が存在するとき, その応力拡大係数を

$$K_I = \sigma_y \sqrt{\pi a}$$

で示す. そして,  $K_I \geq K_{Ic}$  の条件を満たすとき, き裂は不安定に伝播して材料が破壊する. この  $K_{Ic}$  を材料の破壊靱性といい, 材料固有の値をとる. 従って  $K_{Ic}$  が脆性的に破壊しやすいかどうかの目安を与えることになり, 脆性材料の加工における材料除去と深い関わりをもつ.



# 表面性状と強さ

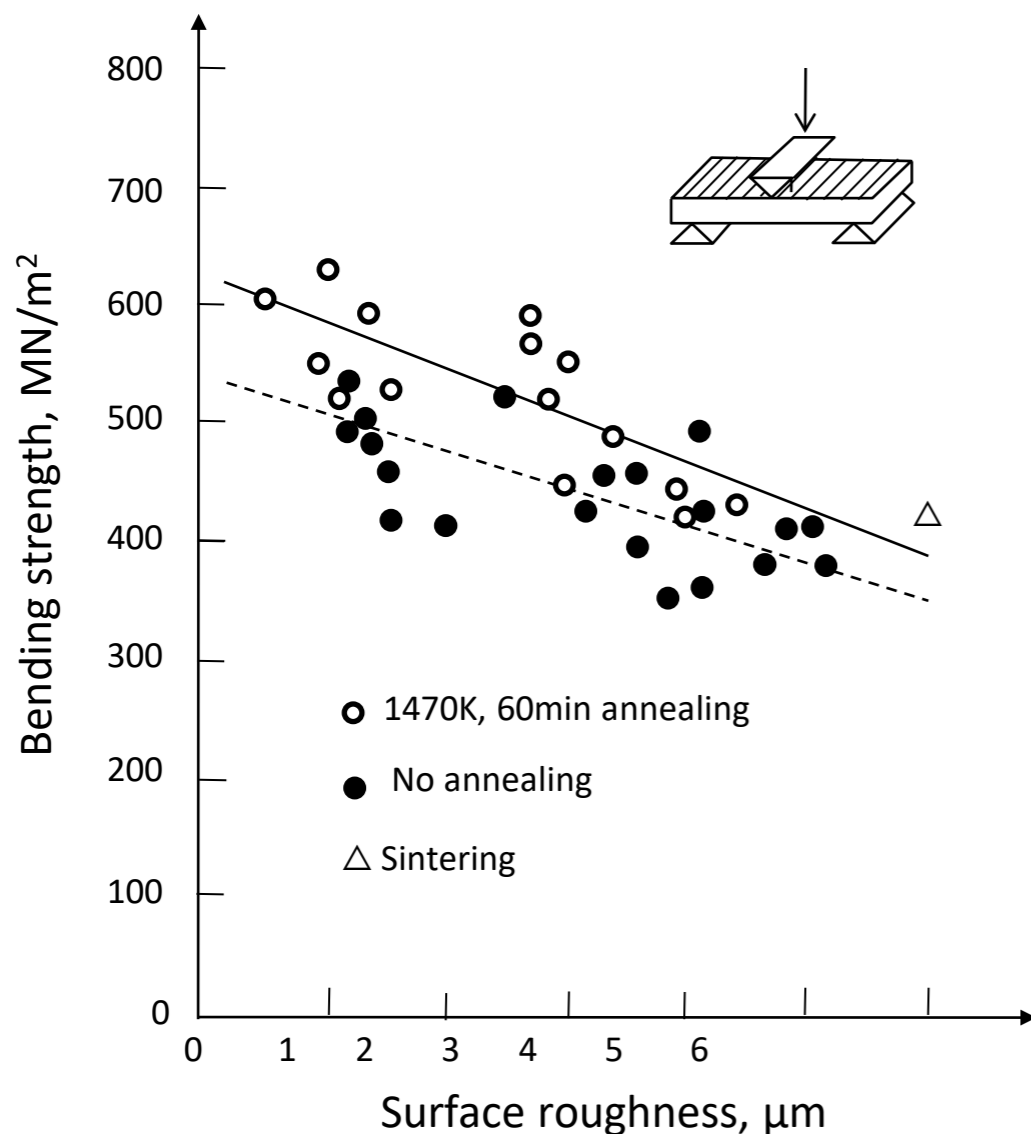


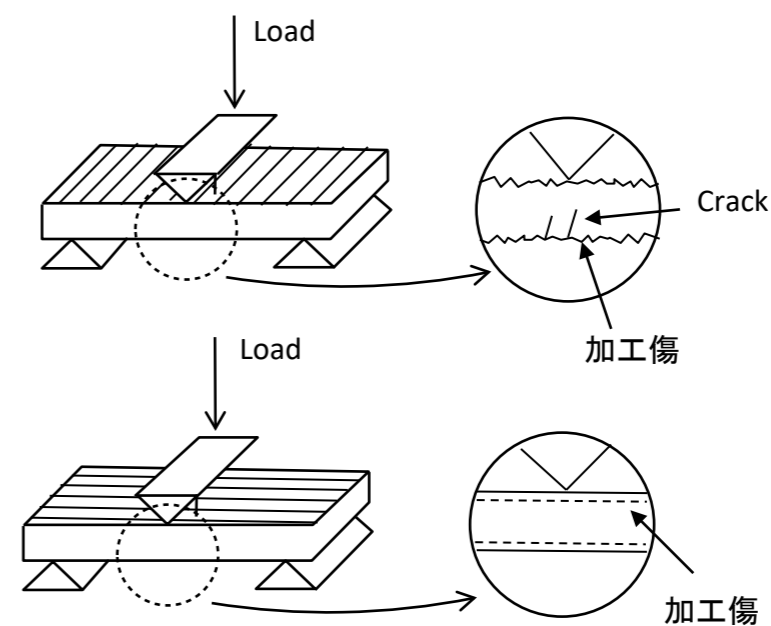
図. 焼結アルミナの研削加工仕上げ面粗さと曲げ強さの関係

セラミックスの機械加工は、超硬質工具や砥粒で削るため、加工面に人工傷を残す。

Q. 強度はどうか？

粗さが小さくても鋭い傷 (き裂先端曲率半径が小さい) が残っていると、強さが小さくなる。

研削傷の方向と強度測定方向の関係によっても強度が変わる。



50~60%強度が変わる。



# 焼鈍効果

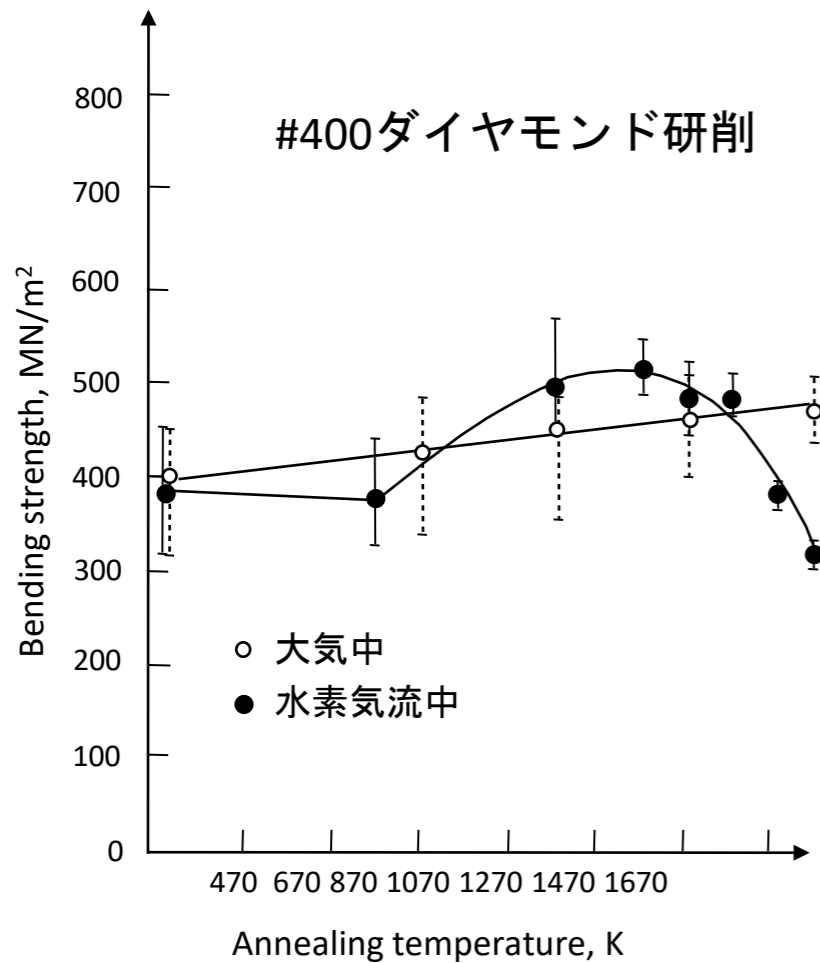
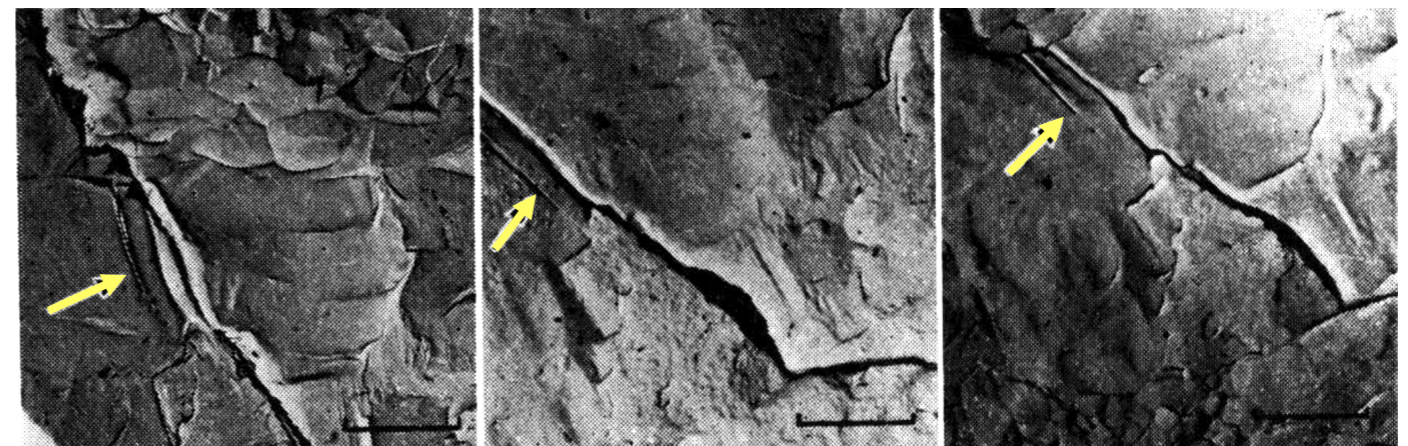


図. 焼結アルミナの焼鈍効果 (60min, 徐冷)

焼鈍効果の機構 (予測) :

- 表面の加工傷形状の焼鈍による変化
- 例えば, アルミナは, 高温でH<sub>2</sub>ガスと反応し, 蒸気からα-アルミナを析出する. 水素気流中での焼鈍効果に寄与.
- 大気中の焼鈍では, 表面とき裂内部の蒸気圧の差によって, 微細き裂が埋められたり, き裂先端の曲率半径が大きくなる可能性がある.



(a) 未焼鈍 (b) 1470K 焼鈍 (c) 1770K 焼鈍

図. 焼鈍(60min)による焼結アルミナの微細き裂の消滅

Q. 焼鈍でどのような効果があるか？

ダイヤモンド圧子で圧痕を与え, 角部から発生した1本のき裂の先端付近をSEMで観察. 1770Kではき裂の半分が消滅している. 表層から蒸発したある皆が, き裂状欠陥の底部に堆積し, その結果, 先端部の曲率半径を増大して応力集中係数を下げる.



# 残留応力の影響

焼鈍と残留応力解放との関係をX線回折で調査：

- (330)面のピークの位置ずれ $\Delta 2\theta$  と半値幅の変化を焼鈍温度との関係で示す。
- 焼鈍によって残留応力を解放することを示す。1470Kで顕著に解放される。
- 計算結果によると、表面に70~80 MN/m<sup>2</sup>残っていた引張り残留応力は、30~50 MN/m<sup>2</sup>に減ずる。その分だけ、強さが増大する。

焼鈍によって、表面損傷の無害化をはかり、強さのばらつきを減少し、残留応力を除去することは重要である。

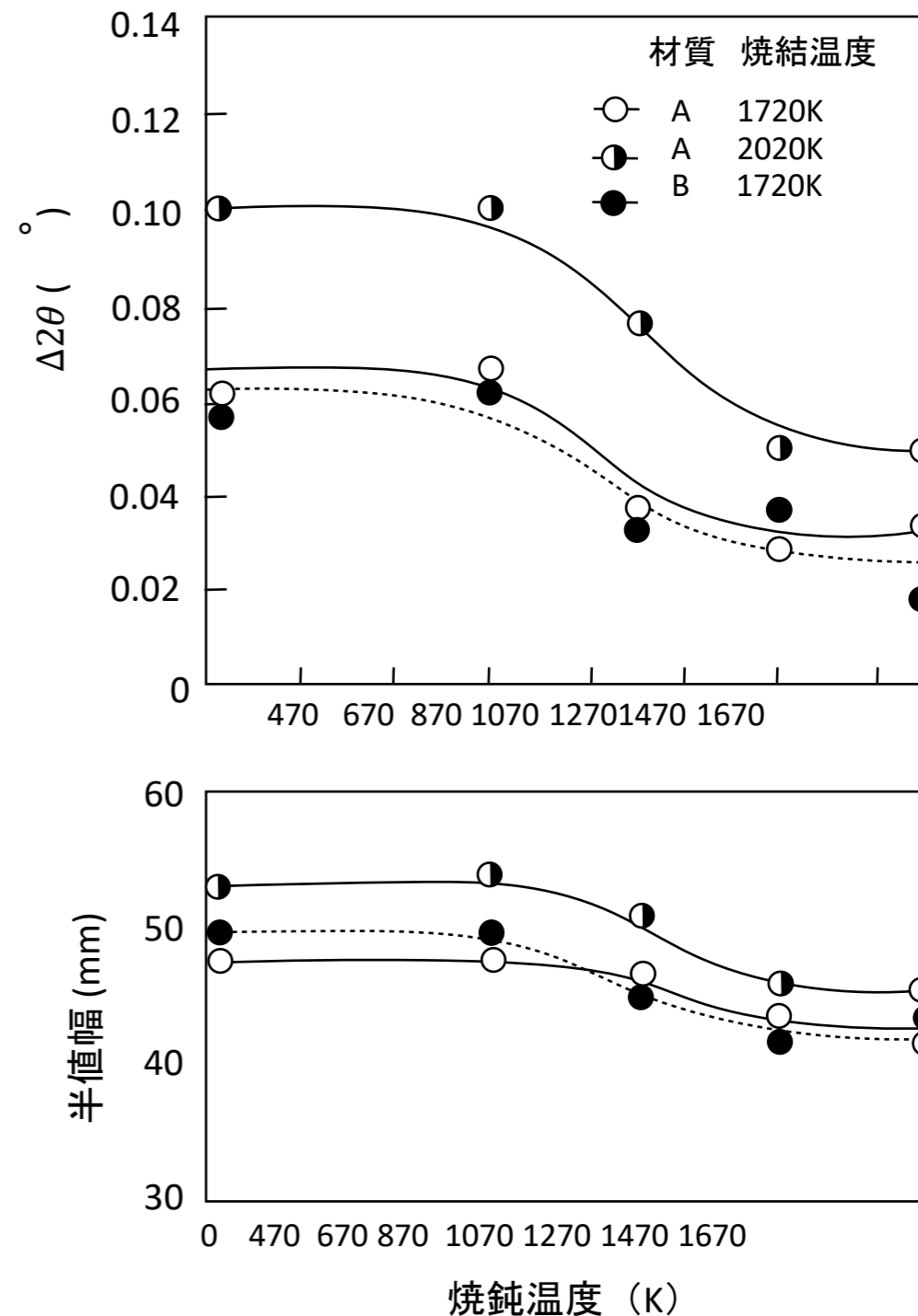


図. 焼結アルミナ(330)面回折図形のずれと焼鈍温度の関係

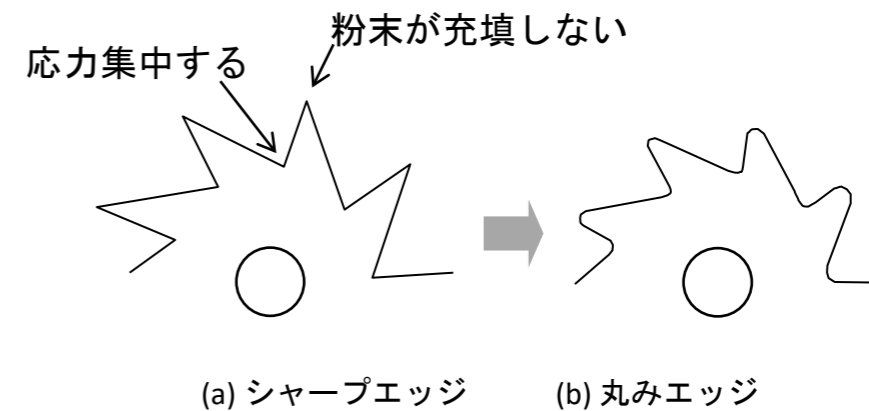


# 形状設計とその問題

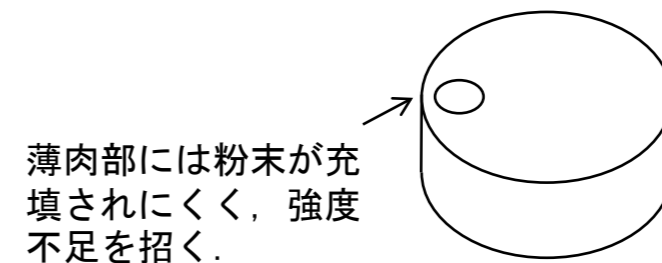
熱間静水圧成形（HIP成形）は、加圧が静水圧による等方性であり、コンテナに密閉された成形体の周囲から高温下で高圧ガスで加圧する。均質性に富み、高強度材の製造が可能となる。複雑成形に難があるが、コールドプレス(CP)したものを再びHIP成形することで高強度複雑形状部材が可能となる。

形状的制約：

(a)では、エッジの先端部には粉末が詰まりにくい、  
鋳造における湯流れの問題と類似する。



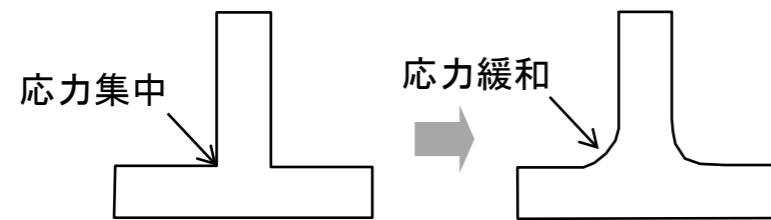
押し型成形を行うとき、押し棒の薄肉部の強度不足をきたし、焼結時の収縮が厚肉部と薄肉分で異なり、変形や割れを生じる



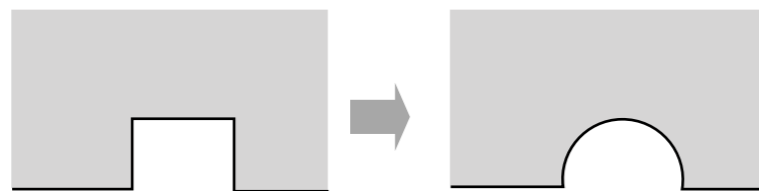
Q. 成形寸法にどのような制約が生じるか？



# 強さに対する配慮



隅部の応力集中防止



溝部の応力集中防止



底部の応力集中防止

## <応力集中の影響>

- 応力集中部では、き裂形状の先端の曲率半径に応じて、固有強度を大きく上回る応力を発生して、破壊に至る。
- 金属材料のような、延性を有するものは、集中応力によって塑性変形を生じるにとどまるが、セラミックスのような脆性材料では、塑性変形を生じずに、その場で脆性破壊を起こす。
- そのため、角部を落として、チャンファや丸みを与える。

Q. 加工にどのような制約が生じるか？



## <切りくず生成>

- 金属と同様に加工できるのか. セラミックスは, 脆性材料であるため, 刃物による切削でも脆性破壊で切りくずが生成されると考えられる. 切削条件との関係で, 加工条件によっては, 塑性変形による切りくずを生ずる場合がある.

## <加工による損傷>

- 加工面に残る損傷, 主にき裂は部材強度に影響する.
- 脆性破壊によって切りくず生成が行われても, 加工面にき裂状損傷を残さない場合がある. ミクロ領域の破壊力学で説明する必要がある.

## <加工能率>

- 重加工できるのか, 軽加工しかできないのか.
- 機械構造部材に用いられるセラミックスは, 高強度, 高硬度であり, 当然, 材料より高強度, 高硬度な工具を用いる必要がある. 例えば, ダイヤモンドが当てはまるが, それでも大きな切込みはできない. 工具切れ刃に大きな応力が集中し, 切れ刃の破損 (チッピング) を招く.
- 軽加工は, 単位時間あたりの加工量が少ないため, 加工コストが増大する. これを解決するには, 軽加工による同時多数の加工方法を行う必要がある.



# 加工方法の選択

これまでの理由から、セラミックスの機械加工に求められる精度は高くなる。

- 研削加工は、砥粒切刃の不揃いのために、限界がある。
- 単刃で削る切削加工では、工具が摩耗もしくは欠損を生じない限り、工作機械の精度に依存した加工精度が得られる。しかし、工具の欠損が問題となる。
- ポリッシングやラッピングは、圧力加工で、工作機械の精度に依存しないため、 $Al_2O_3$ やSiC, ダイヤモンド砥粒で多用されてきた。しかし、加工能率が低い。

## 加工方法の選択

- 加工変質層 (affected layer) は、1個の工具が与える影響が少ない点で、砥粒加工の場合に変質が少なくなる。
- 不安定き裂伝播による脆性破壊で切りくず生成する場合と、塑性流動によって切りくず生成する場合がある。

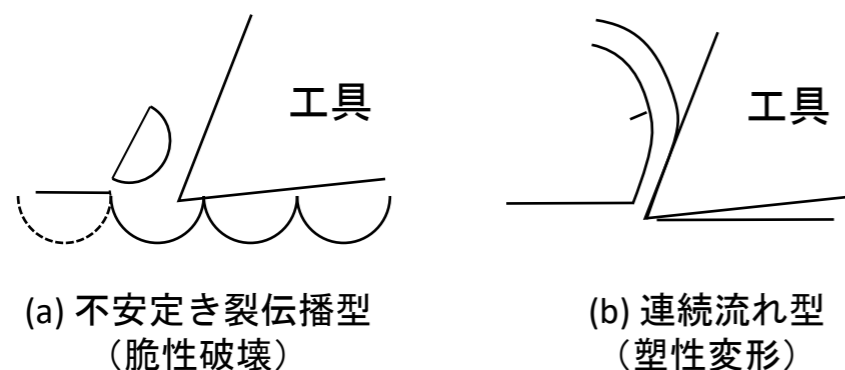
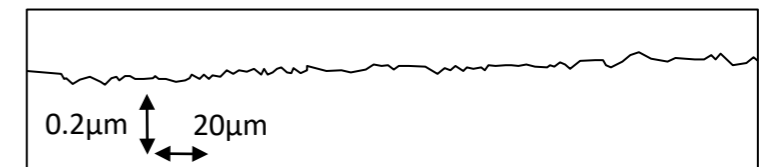
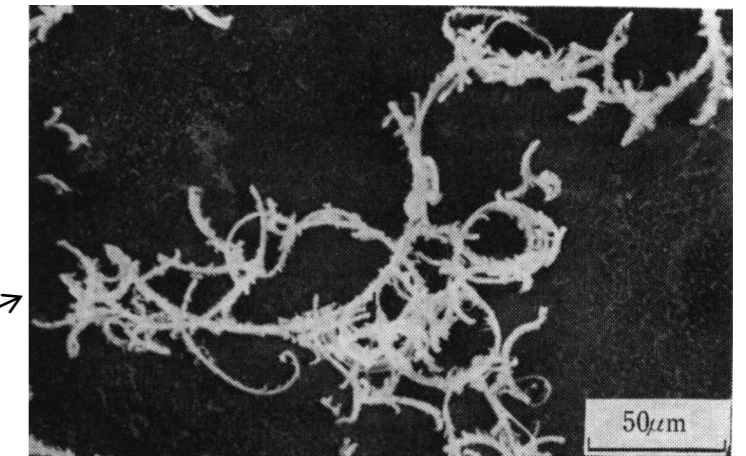


図. セラミックスの切りくず生成



表面粗さ



切りくず

切込みが10 $\mu$ mを超えると不安定き裂伝播型になる。

図. ダイヤモンドバイトによる $ZrO_2$ のマイクロ切削  
 $V=30$ m/min,  $s=2$  $\mu$ m/rev,  $d=2$  $\mu$ m, CNC旋盤

Q. 高精度化のためにはどのような加工が良いか？



# ワーク損傷に対する加工の配慮

☆ 研削加工において、アップカットをとるか、ダウンカットをとるか。

MgO単結晶の研削加工例：

- MgOは、NaCl型の結晶で(100)面でへき開し、(110)方向のすべりによってき裂を生じる（加工の損傷を受けやすい）。
- ダウンカットの場合、き裂が内部に侵入する割合が少なく、すぐに自由面で解放されるため、抵抗・損傷が少ない。

☆ 工作機械への要求

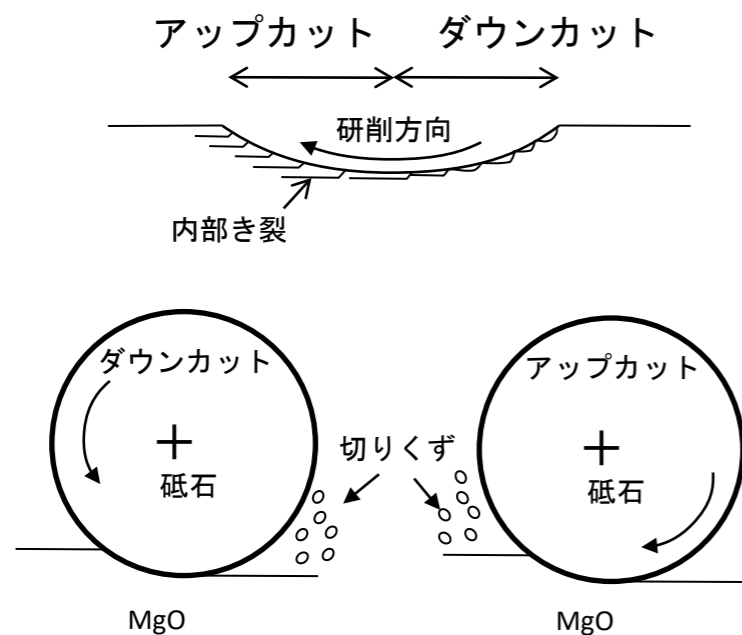


図. MgOのアップカット研削とダウンカット研削

<精度>

- ・ 主軸の回転精度 0.1  $\mu\text{m}$ -0.2  $\mu\text{m}$
- ・ 真直度
- ・ 静剛性, 動剛性

<微小切込み装置>

- ・ 0.1  $\mu\text{m}$ 以上の最小切込み

<工作物の保持>

- ・ 非磁性物のチャッキング
- ・ 容易着脱.

<工作機械の構成>

- ・ 複合機械への期待
- ワンチャッキングでの加工による精度向上



# 本日の構成

## 1. 各種材料の基礎と切削方法

### 1.1 各種材料の特徴

- ・ セラミックス
- ・ ガラス
- ・ 複合材料

### 1.2 マイクロ切削

## 2. 研究からみた硬脆材料の加工

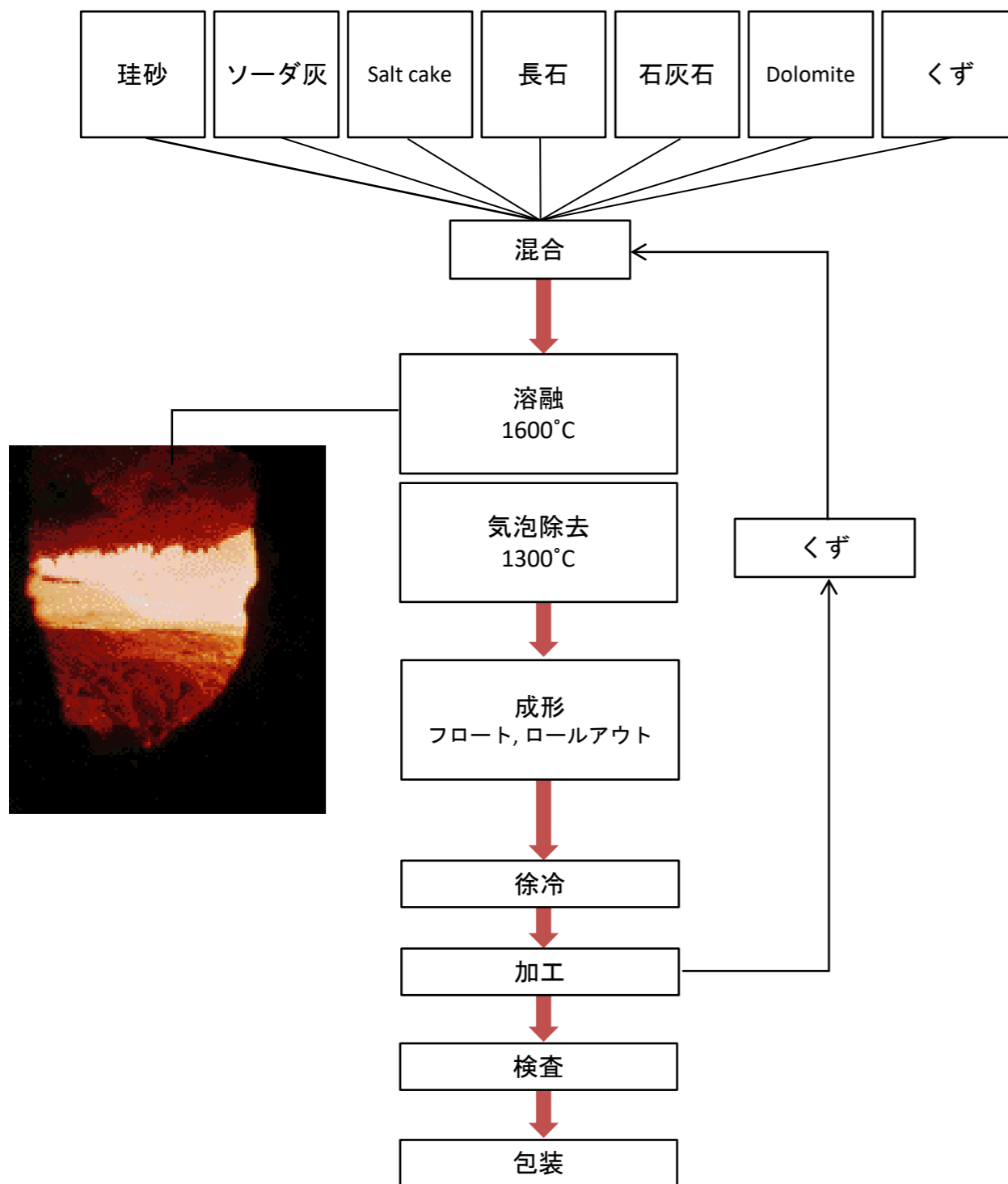
### 2.1 セラミックスの熱援用加工

### 2.2 ガラスのレーザ援用加工

### 2.3 CFRPの加工



# ガラスの製造

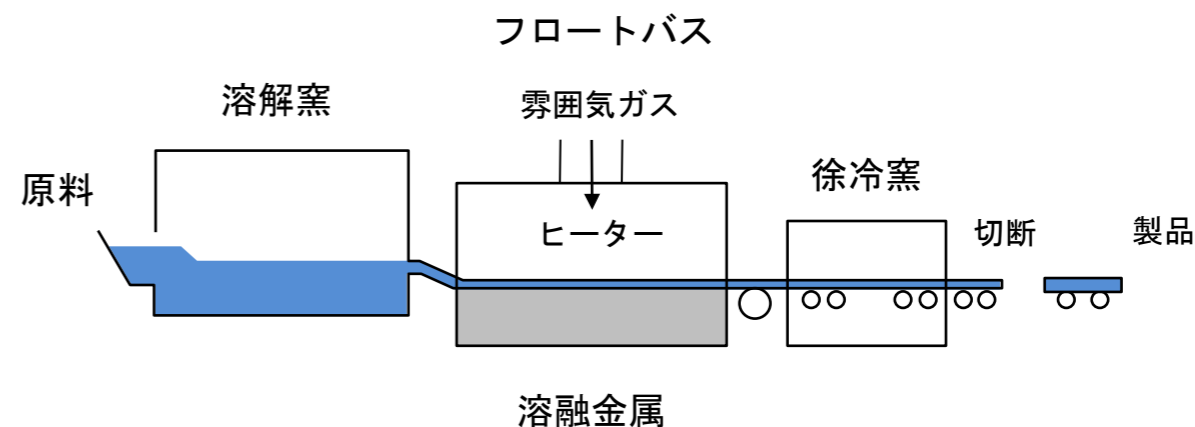


## Q. 知ってるガラスの種類は？

フロート板ガラス：

- ・ 窓や鏡、自動車や鉄道車両の安全ガラス
- ・ 溶かしたガラス素地を熔融金属の上に浮かべ、厳密な温度操作で厚み・板幅の均一な板ガラスに成型する。
- ・ 熔融金属の表面は水平なので、ガラスも自然に平行平面に仕上がる。

## フロート法



# ガラスのいろいろ

## 強化ガラス：

- 板ガラスを約700°Cに加熱したあと、急速に冷やしてつくる「焼き入れ」をしたガラスで、板ガラスの3～5倍の強度になる。
- 割れても破片が粒状になる。自動車や鉄道車輛、ビルなどに利用される。

## ガラスの色：

- よく見ると、わずかに緑がかって見える。これはガラスのなかに混じっている鉄イオンに起因する。つまり、ガラスの色は、ガラスに含まれる金属イオンによってつくられる。
- 金属イオンは、ガラスに入ってくる光のスペクトルの特定の光線を吸収し、それ以外の光線は通す。そこで、たとえば青いガラスにしたい場合は、青系統の光線を透過させるように、その補色となる赤-黄の光線を吸収する金属イオンをガラスに含ませる。着色用の金属イオン原料としては、酸化鉄や酸化ニッケル、酸化コバルトなどが用いられている。



# ガラスの種類

- 石英ガラス：耐熱性、化学的耐久性に優れ、最高の医療・理化学用ガラス。熔融、成型が困難で、価格が高いという難点がある。
- ホウケイ酸ガラス：一般的な医療・理化学用ガラスで、 $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ の組成から成る。熱膨張係数が小さいので、熱衝撃温度が高く、酸化ホウ素( $\text{B}_2\text{O}_3$ )も多く含んでいるため、化学的にも耐久性がある。
- ソーダ石灰ガラス：基本的に $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ の組成から成る。アルカリ分が多く、アルカリ溶出量や熱膨張係数が大きいので、急激な温度差を与えると割れたり、熱水で煮沸するとガラスからアルカリ成分が溶け出す。
- 無アルカリガラス：NaやKなどのアルカリ成分を含まない。表面が非常に平滑である。熱膨張に強い。非常に薄い(1ミリ以下)。環境に配慮されている(AsやSbを含有しない)

	組成 (wt%)						比重 g/cm <sup>3</sup>	膨張係数 °C <sup>-1</sup>	軟化点 °C	用途
	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	その他				
石英	100	—	—	—	—	—	2.20	5×10 <sup>-7</sup>	1650	特殊
ホウケイ酸	73.0	11.0	6.5	6.0	0.5	K <sub>2</sub> O BaO	2.34	52×10 <sup>-7</sup>	785	医理用
ソーダ石灰	70~73	—	1~1.8	13~15	7~12	MgO	2.50	85×10 <sup>-7</sup>	730	窓ガラス

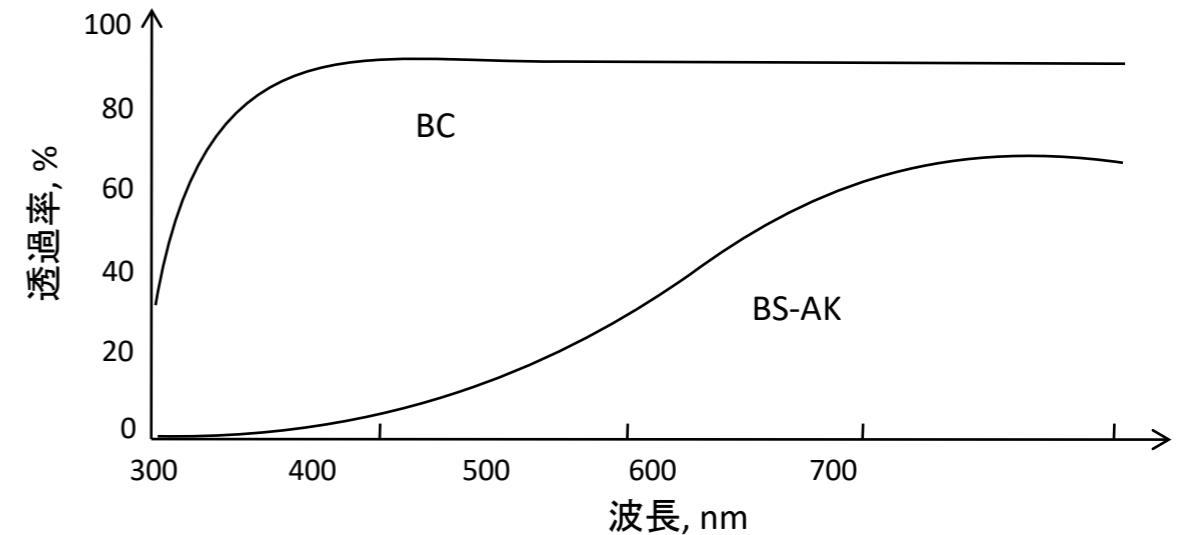


# ガラスの性質

- ガラスの強度：ガラスの理論強度は、 $\sim 10,000$  MPa であるとされているが、実際のガラスは、 $30\sim 50$  MPa と非常に低くなっている。

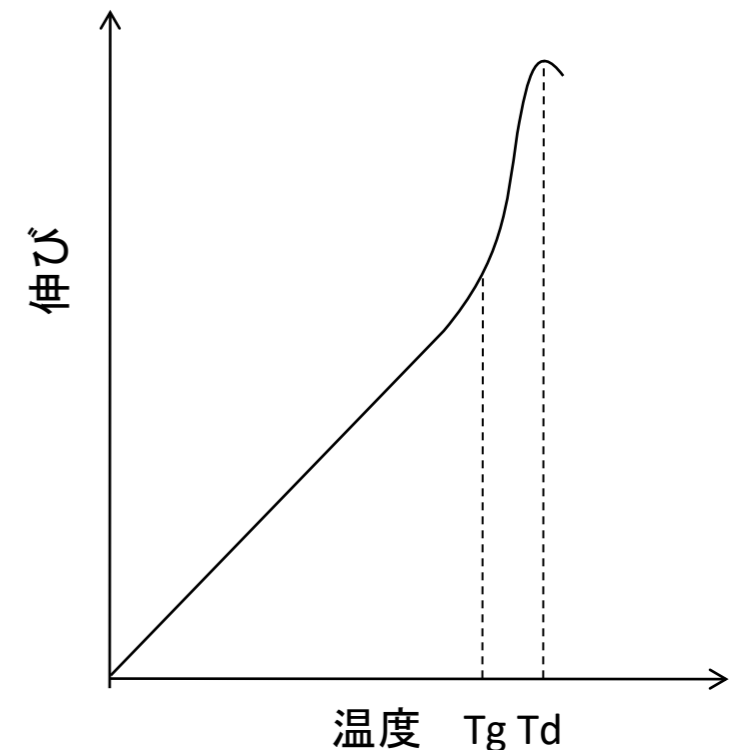
Q. なぜだろうか？

- ホウケイ酸ガラス（BC）の透過率曲線を下図に示す。同時に茶色のガラス（BS-AK）の透過率曲線も示す。茶色のガラスの中に、鉄（Fe）イオンを入れ着色しているのは、光を吸収させるためである。



- 化学的耐久性は、水や酸に対しては強いが、アルカリ性溶液には弱い材料となる。 Q. 有名な溶液は？

- 熱を加えると、わずかだが長さ（体積）が大きくなる。熱膨張が小さなガラスほど、急激な温度変化に耐えられる。（石英ガラス熱膨張係数 $\alpha=5\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$  ホウケイ酸ガラス $\alpha=52\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$  ガラスコップ $\alpha=100\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ）
- ひずみ：ガラスの表面層と内部層に温度差を生じさせないようゆっくりと冷却することが必要。



# その他の特徴

- 分相現象・・・単一相のガラスが、二つ以上のガラス相に分かれる現象を分相と言います。熱処理や熱加工によって $\text{SiO}_2$ 相に富む相と $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{Na}_2\text{O}$ 相とに分相し、分相したガラスは、化学的耐久性が著しく劣化します。
- フレーク・・・容器（ガラス瓶等）の液中に一見ガラスの薄片のような透明の針状・ウロコ状の膜片が生成していることがあり、これをフレークと言います。これは、ガラスから可溶性のホウ酸・アルカリ分が溶け出て、残った含水シリカの骨格が膜状となってガラス表面に残り、液がアルカリ性になると次々に剥離してフレークをつくるのです。フレークを生じているガラスは、アルカリ性溶液には弱くなります。
- 失透現象・・・ガラスを長時間高温で加熱すると、表面または、内部に不透明な箇所を生じることがあります。これは、ガラス中に結晶が析出したもので、この現象を失透と言います。こうした失透現象は、ガラスの液相温度よりやや低い温度に長時間保たれると生じ、これを抑えるために $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ などの成分をガラスに加えてあります。



# 本日の構成

## 1. 各種材料の基礎と切削方法

### 1.1 各種材料の特徴

- ・ セラミックス
- ・ ガラス
- ・ **複合材料**

### 1.2 マイクロ切削

## 2. 研究からみた硬脆材料の加工

### 2.1 セラミックスの熱援用加工

### 2.2 ガラスのレーザ援用加工

### 2.3 CFRPの加工



2種以上の構成材料を効果的に複合することにより、単一材料では持ち合わせない特性を有するようになった材料。



- ・ 軽量高強度・高弾性率などの優れた特性
- ・ 金属や高分子とは異なる力学特性。
- ・ 微視的な非均質性，方向による異方性。



- ・ 繊維強化材料の力学特性をモデル化する
- ・ 右図は，一方向連続繊維強化材  
繊維強化方向をL軸  
面内繊維垂直方向をT軸  
板厚方向をZ軸

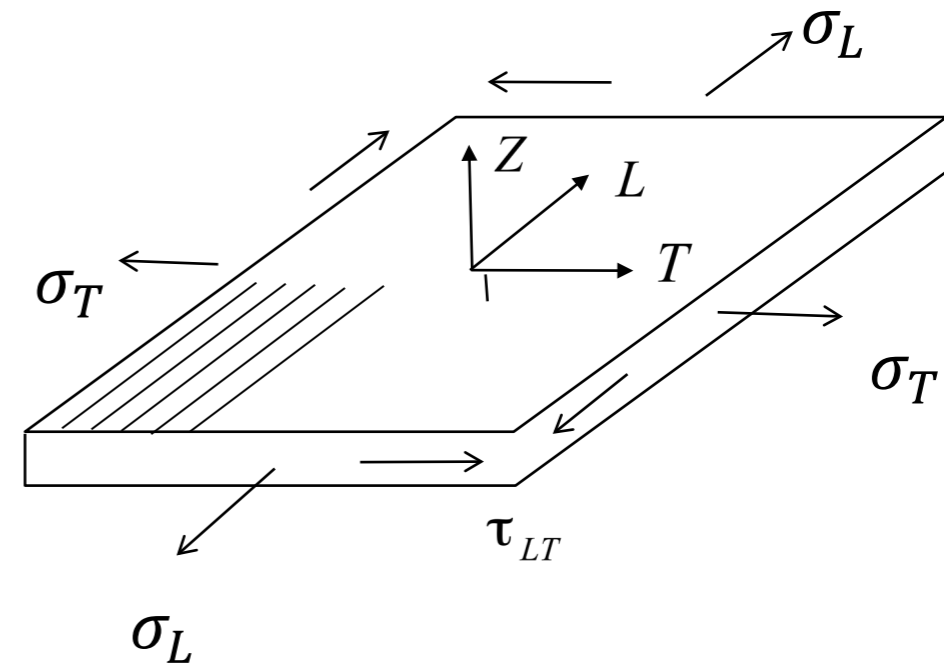


図. 一方向連続繊維強化材とその主軸

Q. 知ってる複合材料は？



# 一方向材の縦弾性率（ヤング率）

## < 繊維軸方向縦弾性率 >

- ・ 繊維とマトリクスのひずみ  $\varepsilon_L = \Delta L / L$  は、共通で、等方性弾性体として考える。
- ・ しかし、応力は繊維とマトリクスで異なる。
- ・ 断面積を各々  $A_f, A_m$  とし、全断面積を  $A = A_m + A_f$  とすると、応力は下記となる。

- ・ 平均応力を  $\sigma_L$  とすると、全引張荷重  $P$  は、

ここで  $E_L$  は、 $\sigma_L$  と  $\varepsilon_L$  の比例係数として  $\sigma_L = E_L \varepsilon_L$

- ・ 体積含有率を、

とすると、繊維軸方向縦弾性率は下記となる。

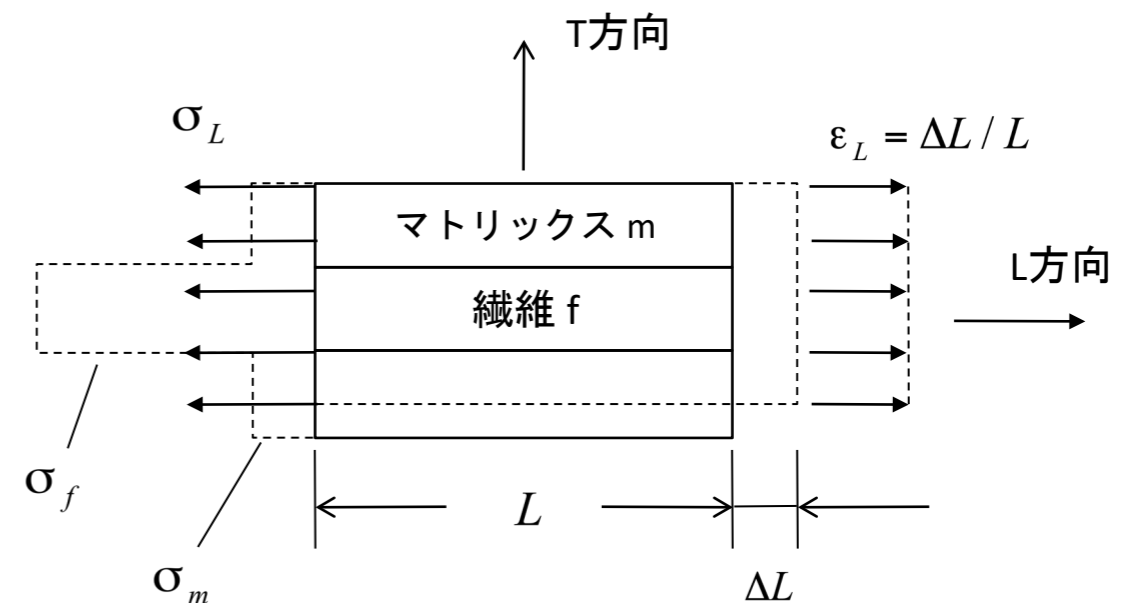


図. 繊維軸方向引張モデル（均一ひずみ）



# ヤング率(2)

## <繊維垂直方向縦弾性率>

- 繊維とマトリクスの応力  $\sigma_T$  は共通で，等方性弾性体として考える.
- しかし，ひずみは繊維とマトリクスで異なり，下記となる.

- 平均ひずみを  $\varepsilon_T$  とすると，T方向の伸び  $\Delta W$  は，垂直方向長さ  $W$  を用いて， $\Delta W = \varepsilon_T W$  となる.
- 繊維，マトリクスの伸びは，

となる.  $\Delta W = \Delta W_f + \Delta W_m$  と  $\sigma_T = E_T \varepsilon_T$  より，

となる.

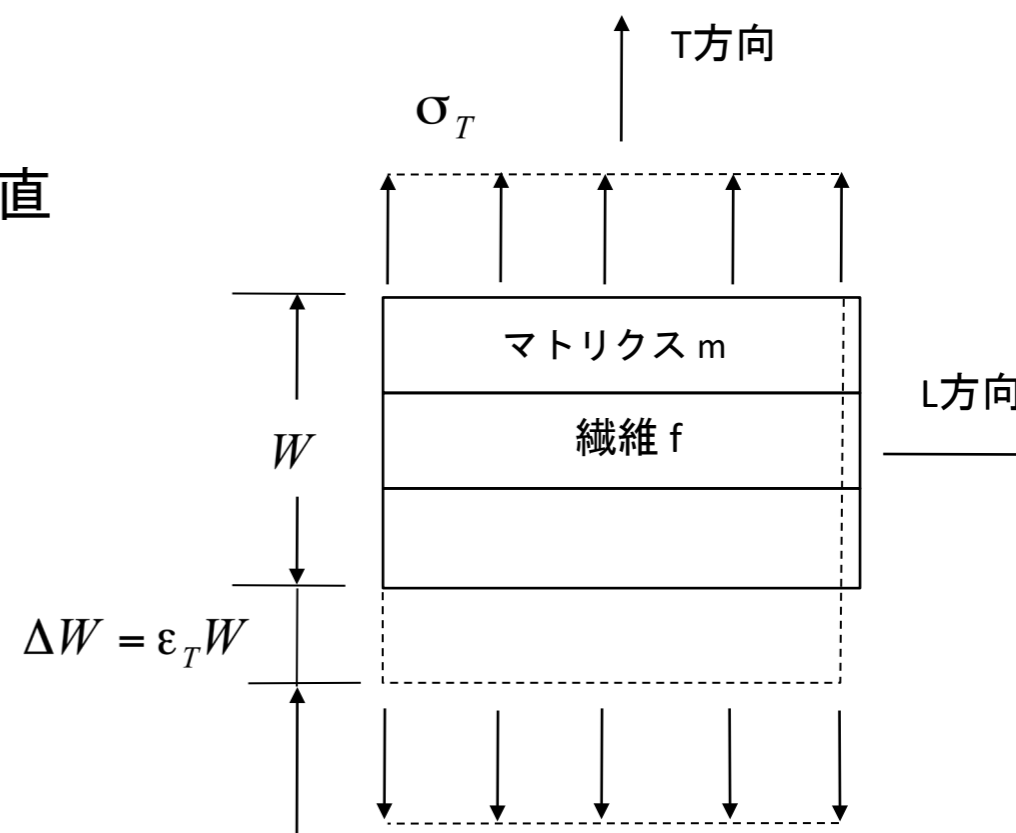


図. 繊維垂直方向引張モデル (均一応力)



# ポアソン比

## <主ポアソン比>

L方向に引張ったときの、L方向の伸びひずみとT方向の収縮ひずみの割合を表す。主ポアソン比  $\nu_{LT}$  は、均一ひずみモデルより、

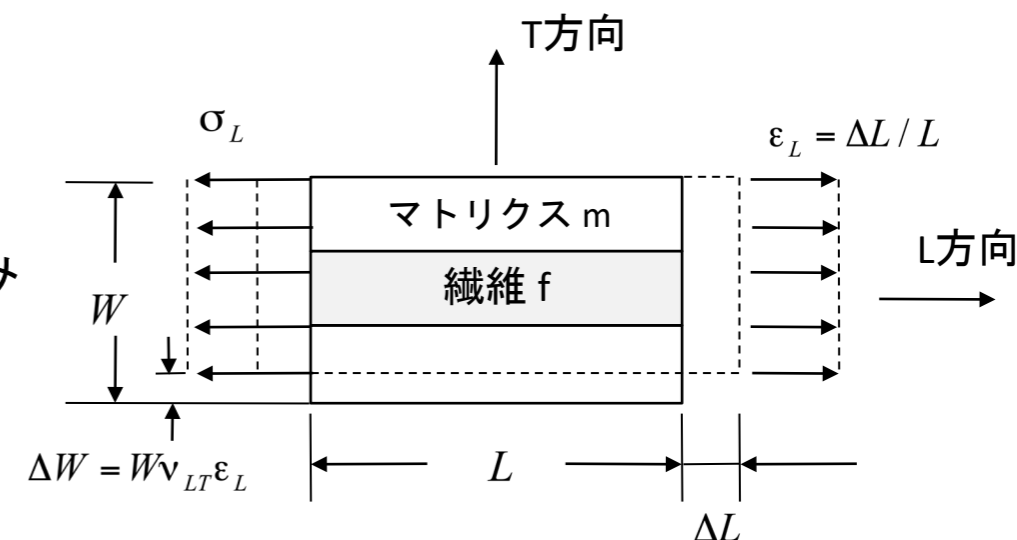
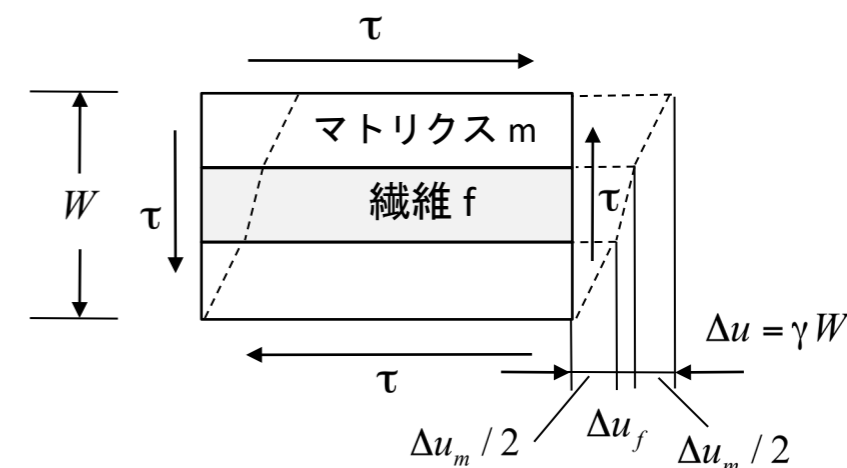


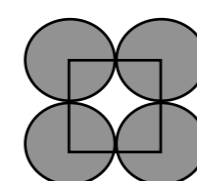
図. 繊維軸方向引張モデル (均一ひずみ)

## <面内せん断弾性率>

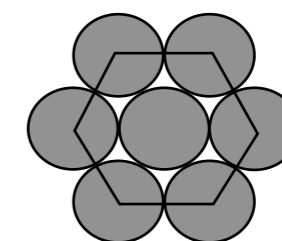
均一応力モデルより、次式で与えられる。



繊維体積含有率  $V_f$  は、複合材料の力学特性を決める重要なパラメータとなる。断面内につめられる繊維の量には上限が存在する。通常は、0.5~0.6くらい。



$V_f = 0.785$

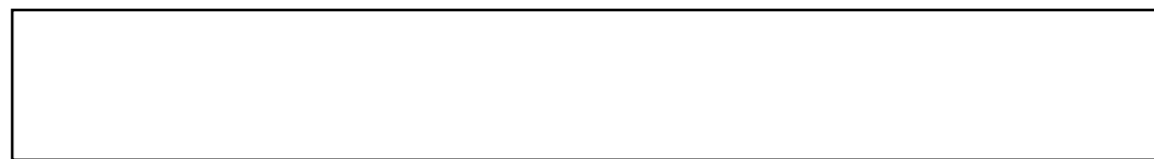


$V_f = 0.905$



## 一方向連続繊維強化材の繊維方向引張強度：

- ・ 繊維方向の平均応力 $\sigma_L$ は、繊維、マトリックスが弾性、塑性状態にかかわらず次式となる。



- ・ 右図のように、 $\varepsilon_{fT} < \varepsilon_{mT}$  の場合、均一ひずみ状態で引張られるとすると、繊維が先に破断する。

最終引張強度  $F_L$  は、次式となる。

$$F_L = \sigma_{ft} V_f + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (1)$$

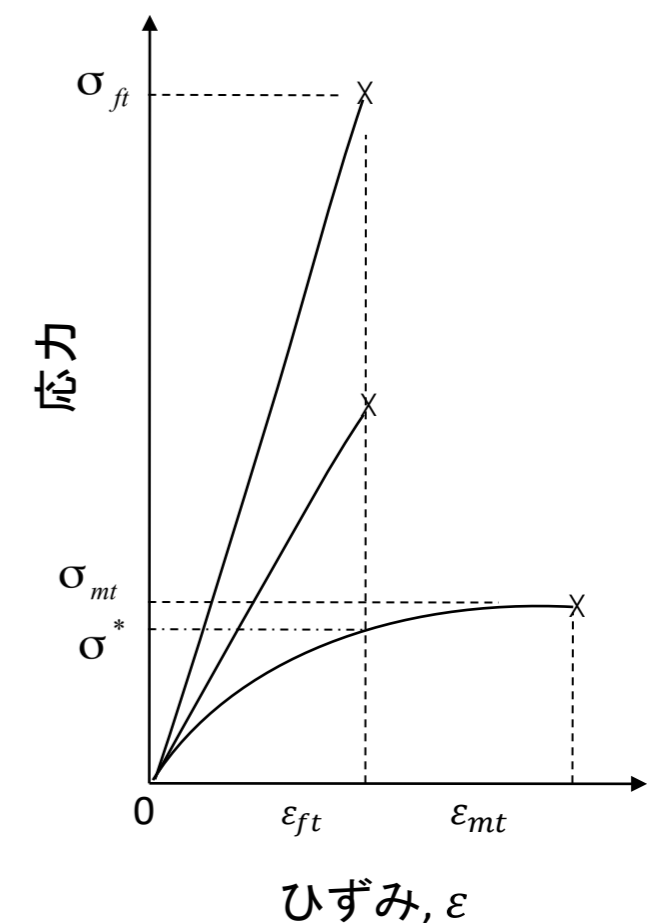
$$F_L = \sigma_{ft} V_f + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (V_f > V_{fc} \text{ の場合}) \quad (2)$$

$$F_L = \sigma_{mt} (1 - V_f) \quad (V_f \leq V_{fc} \text{ の場合})$$

ここで、 $V_{fc}$  は、上式の交点で、

$$V_{fc} = \frac{(\sigma_{mt} - \sigma_m)}{(\sigma_{ft} + \sigma_{mt} - \sigma_m)}$$

であり、通常、 $V_f > V_{fc}$  となるため、(1)を使えばよい。(1)の第1項は第2項に比べ大きいから、 $F_L = \sigma_{ft} V_f$  として計算して良い。



# 繊維強化プラスチック

## 1. 繊維強化プラスチック（fiber reinforced plastics）とは.

1940年代から構造材料用素材として利用したことをきっかけに，構造材料として注目された．船体として非磁性体で耐食性，強度が高い点が注目された．空軍は，航空機用として，高比強度，高比弾性率に注目し，単位密度あたりの強度および弾性率が優れていた．

## 2. プラスチックと強化繊維

繊維強化プラスチックは，母材（母相）にプラスチックを使用し，第2相の強化材に繊維を用いた代表的複合材料である．この材料の物性は，母材の種類と強化繊維材料の種類および強化繊維の形態および充填量により変化する．このFRP材料は，必要な物性を設計することができる素材である

プラスチック母材には，熱硬化性プラスチックと熱可塑性プラスチックがある．

**熱硬化性プラスチック**：液状の樹脂原料と硬化剤を混合すると，縮重合が発生し，硬化し固体化する．この硬化反応は，低温では緩やかに，高温ほど促進される温度依存性があり，熱硬化性と呼ばれる．代表的なものは，不飽和ポリエステル樹脂，エポキシ樹脂，フェノール樹脂がある．強度，弾性率は熱可塑性よりも高く，化学的にも安定し，繊維材料との接着強度が高い．

**熱可塑性プラスチック**を母材とする繊維強化プラスチック（FRTP）は，強化繊維を含むペレットを作成しておく．このペレットを成形時に熔融し，プラスチックと同じ方法で成形する．時間当たりの生産量は，熱硬化性プラスチックよりも高い．ナイロン樹脂，ポリカーボネート樹脂，POM樹脂などがある．



第2相は繊維状のものを使用する。強化繊維は、材料自身が高強度であるだけでなく、細長い形状のため大きな欠陥が入りにくいため、強度が上がる。断面形状は円形が多く、7 $\mu$ mから15 $\mu$ mまでのものが多い。

無機材料では、ガラス繊維と炭素繊維が多い。有機系では、ケブラー繊維や冷延伸した熱可塑性樹脂が使われる。繊維の強度を保持するため、200本から1000本の単繊維をサイジング剤により集束した繊維束で使用する。

- ・ **ガラス繊維** (Glass fiber)の主原料はSi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>であり、他の成分により、化学的性質や強度が変化する。主なものにEガラス、Sガラス、Cガラスがある。  
Eガラスが使用されているガラス繊維の90%以上。絶縁用繊維とも呼ばれる。  
Sガラスは、高強度構造材用で航空機のFRP部品に使用される。  
アルカリ性の環境および溶液に腐食されるため、Cガラスが開発された。
- ・ **炭素繊維** (カーボン, グラファイト) は、高弾性率炭素繊維、高強度炭素繊維がある。炭素繊維は、グラファイト結晶から構成される。原料は、ポリアクリロニトリル (PAN) が最も多い。炭素化の後、2000 $^{\circ}$ Cから2500 $^{\circ}$ Cで黒鉛 (グラファイト) 化を行う。結晶の状態の相違により、高弾性と高強度が作成される。ピッチを原料として高弾性率の繊維が作られる
- ・ **アラミド繊維** は、有機強化繊維であり、ケブラーとして知られる。アラミドは、微細なモノフィラメントが一方向に配列して作られており、高弾性率と高強度を示す。このモノフィラメントを繊維にまとめている樹脂成分が粘性を有しているため、アラミド繊維が高い吸振特性を示す。



# 強化繊維およびFRPの機械的性質

	引張弾性 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比弾性率	比強度
ガラス繊維						
Eガラス	72.5	3.43	4.5	2.6	28	1.3
Sガラス	84.3	4.59	5.5	2.7	31	1.7
炭素繊維						
高強度 (HT)	230	3.53	1.5	1.75	131	2
高弾性率 (HM)	490	2.45	0.5	1.91	257	1.3
炭素鋼	193	4.12	2	7.72	25	0.5
有機系繊維アラミド	60	2.74	3.3	1.39	43	2
FRP (重量混入率 60%)						
GFRP	14	1.18		2	22	0.6
CFRP (HT)	142	1.76		1.6	110	1.1
CFRP (HM)	250	0.94		1.7	147	0.55
AFRP	78	1.47		1.4	56	1.1



# 本日の構成

## 1. 各種材料の基礎と切削方法

### 1.1 各種材料の特徴

- ・ セラミックス
- ・ ガラス
- ・ 複合材料

### 1.2 マイクロ切削

## 2. 研究からみた硬脆材料の加工

### 2.1 セラミックスの熱援用加工

### 2.2 ガラスのレーザ援用加工

### 2.3 CFRPの加工

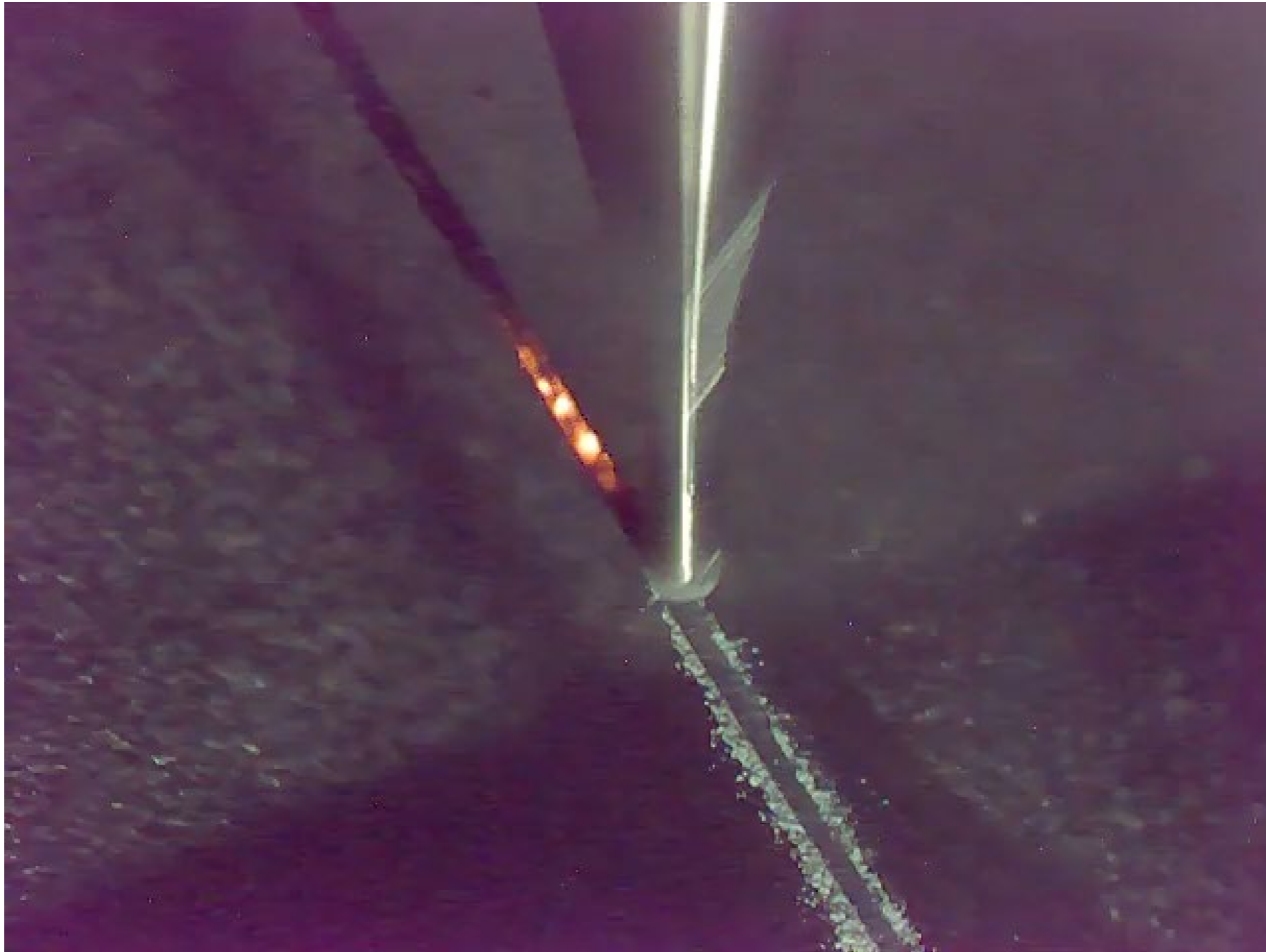


# 研究事例紹介



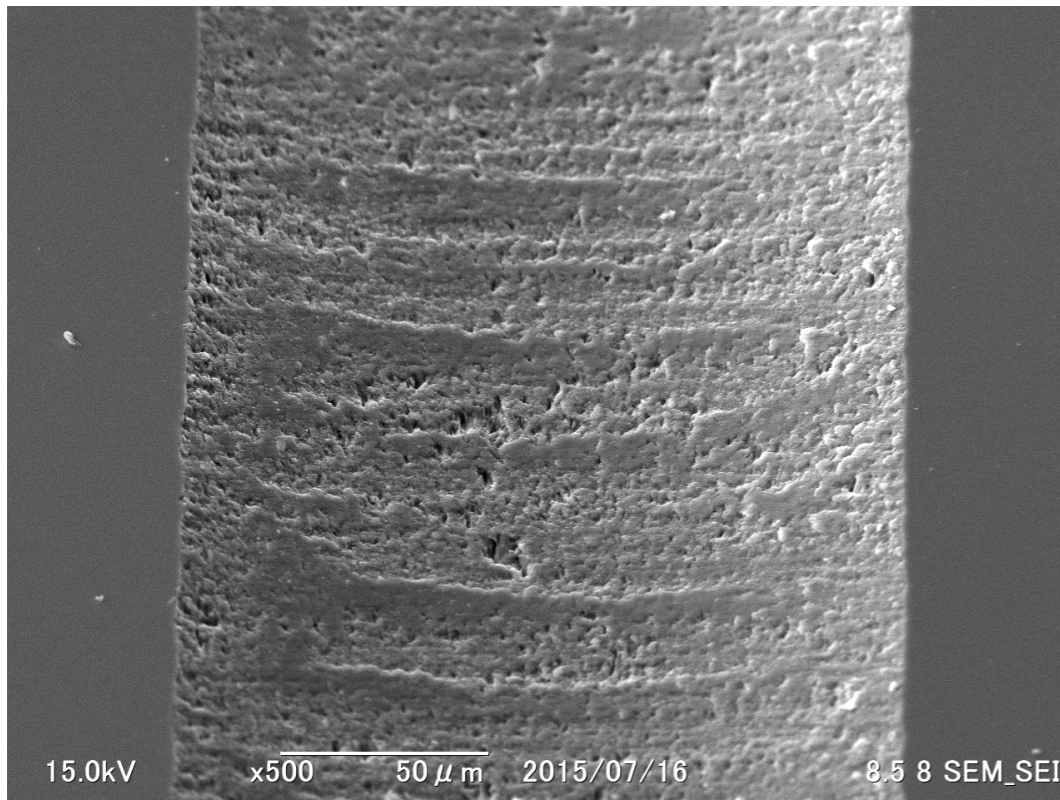
# 加工時映像

送り速度: 10 mm/min, レーザ出力: 20 W

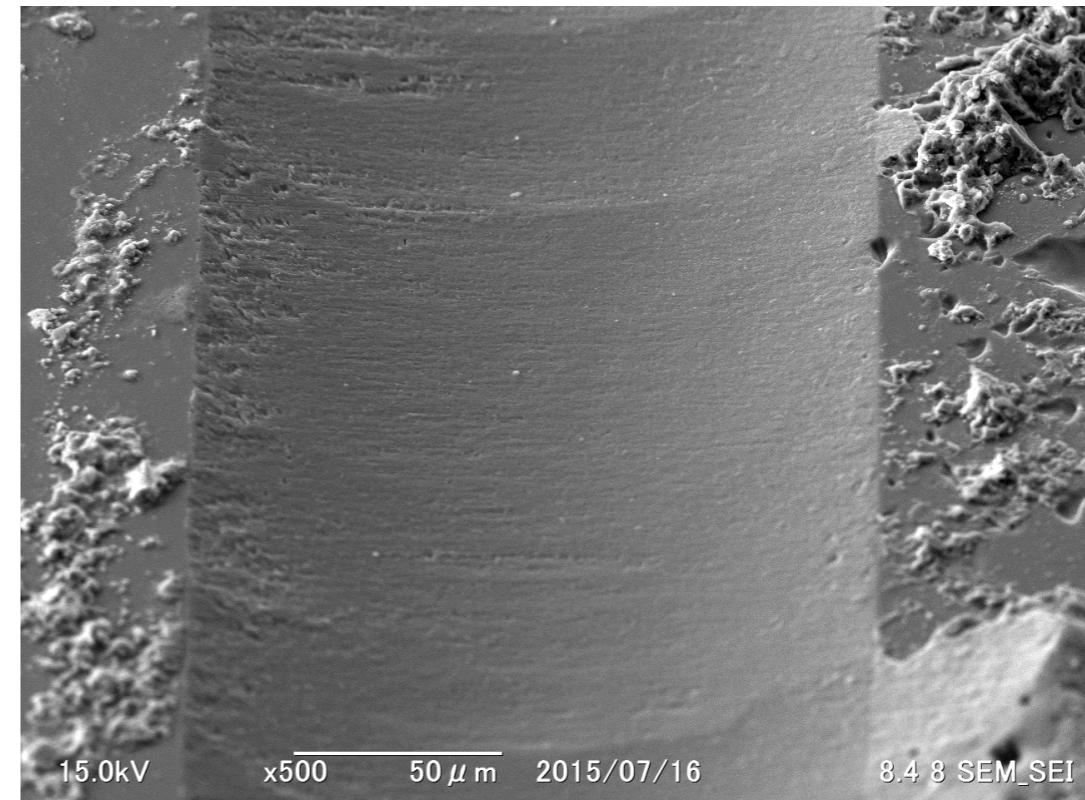


# 実験結果 - 表面性状 -

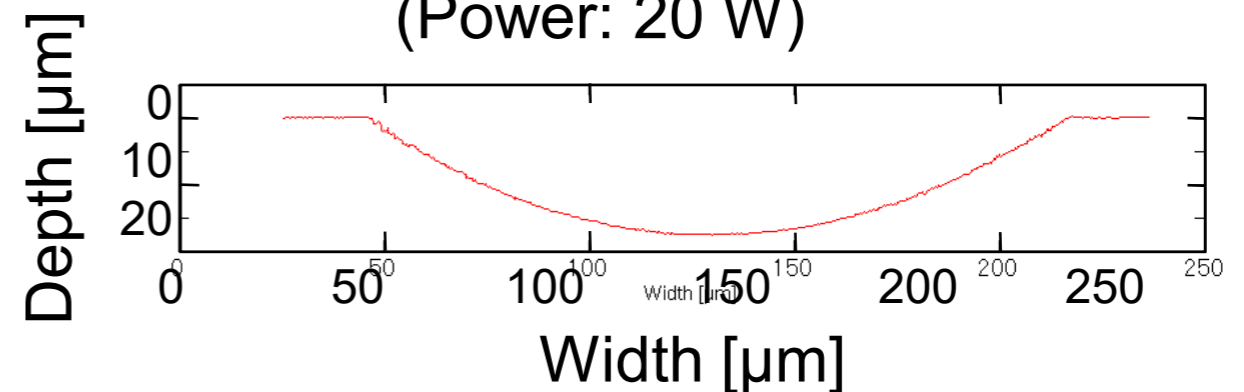
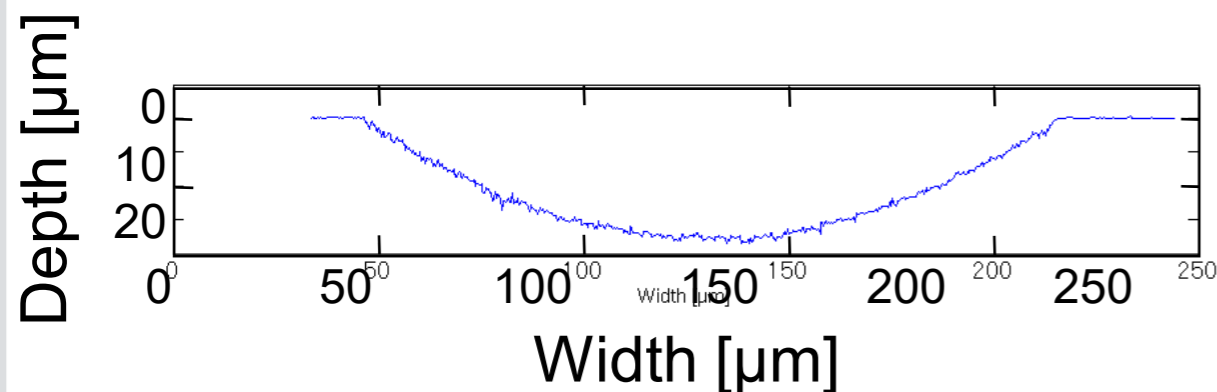
加工後の溝形状の比較 (送り速度 10 mm/min)



Without laser assistance



With laser assistance  
(Power: 20 W)



レーザを援用することでクラック量が減少し，表面性状が改善している



# 本日の構成

## 1. 各種材料の基礎と切削方法

### 1.1 各種材料の特徴

- ・ セラミックス
- ・ ガラス
- ・ 複合材料

### 1.2 マイクロ切削

## 2. 研究からみた硬脆材料の加工

### 2.1 セラミックスの熱援用加工

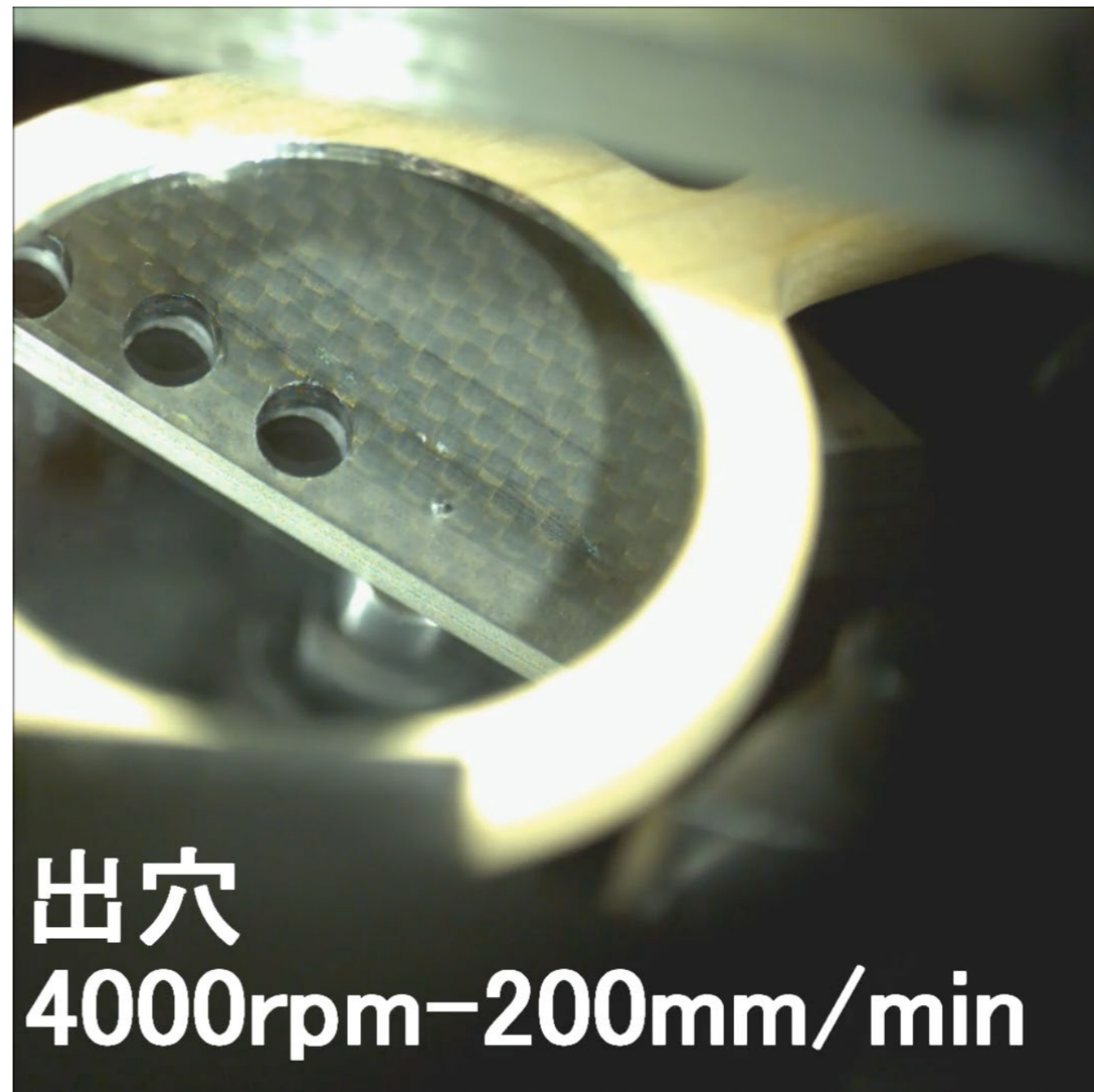
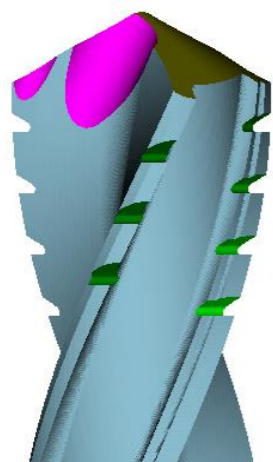
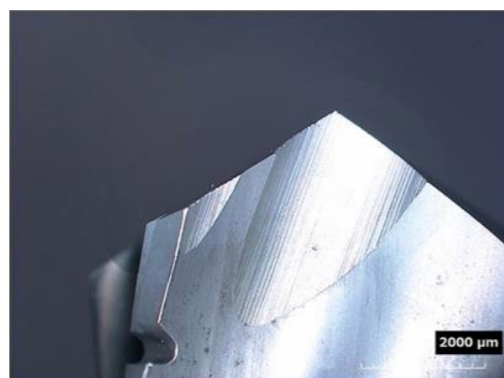
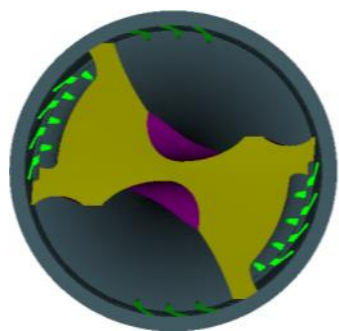
### 2.2 ガラスのレーザ援用加工

### 2.3 CFRPの加工



# 提案ドリルの製造, 実験

材質 : WC-Co (K40UF)  
シンニング : 月光 (ビックツール)  
コーティング : ダイヤモンド  
ねじれ角 :  $18^\circ$   
先端角 :  $130^\circ$



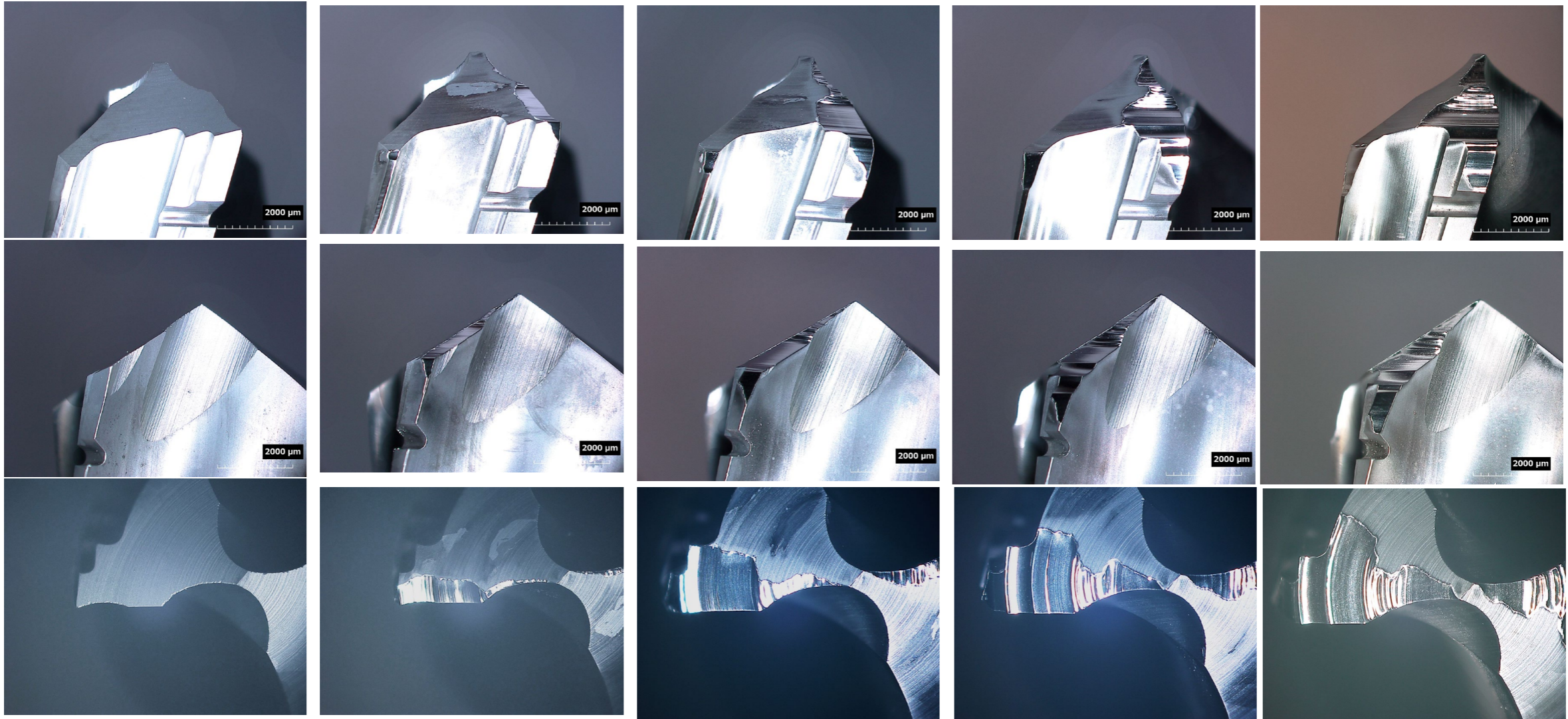
加工前

1001<sup>st</sup>

2001<sup>st</sup>

3001<sup>st</sup>

4001<sup>st</sup>



- VBの**摩耗率は、約 0.5 nm/穴**であった
- 4500穴加工時に、チゼル部が損耗し、工具長さ自体が短くなっていた。
- 外周刃でも底刃と同様の摩耗が生じていた。
- 工具交換をどのタイミングですべきか検討する必要がある。



# 問合せ先

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻  
杉田直彦

<http://www.mfg.t.u-tokyo.ac.jp>

