

# 難削材加工のための切削工具刃先設計

Cutting Tool Edge Design for Machining of Difficult-to-Cut Materials

名古屋工業大学大学院  
工学研究科しくみ領域  
糸魚川文広

- 「知の拠点あいち」：耐熱合金の高能率加工法の開発
- 耐熱合金旋削：工具刃先形状最適化による境界摩耗・欠損抑止
- CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計
- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形法 — Pulse Laser Grinding(PLG)

「知の拠点あいち」：耐熱合金の高効率加工法の開発

「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト事業 ■ <http://www.astf-kha.jp/project/project1/group2/post.html>

- プロジェクト1
- 低環境負荷次世代
- ナノ・マイクロ加工
- 技術プロジェクト
- グループ2
- 難加工性材料の超
- 精密・高能率加工
- 技術の開発
- WGテーマ1
- 耐熱合金の高能
- 率加工法の開発

- メンバー
- 名古屋工業大学
- 名古屋大学
- 愛知工業大学
- あいち産業科学技術
- 総合センター
- 県内企業等14社

## 重点研究プロジェクト事業

・リンク集 ・アクセス ・サイトマップ

・公益財団法人科学技術交流財団
HOME
事業概要
研究室概要
「知の拠点あいち」について

P1

低環境負荷型次世代  
ナノ・マイクロ加工技術の  
開発プロジェクト

P2

食の安心・安全技術  
開発プロジェクト

P3

超早期診断技術  
開発プロジェクト

リサーチコーディネータ事業

プロジェクト1

低環境負荷型次世代ナノ・マイクロ加工技術の開発プロジェクト

HOME > プロジェクト1 > グループ2 > 研究テーマ

グループ2 研究テーマ

テーマ「難加工性材料の超精密・高能率加工技術の開発」

ワーキンググループテーマ1 耐熱合金の高能率加工法の開発

ワーキンググループリーダー: 名古屋工業大学 教授 糸魚川文広

インコネルを素材とするジェットエンジン用耐熱合金部品の高能率加工を実現する切削加工の要素技術を確立する。具体的には、高性能セラミックミリング技術の開発、ロータリ切削による能率向上、切削抵抗と刃先温度のin-situ観察技術、刃先形状の工夫による高能率切削技術を実現するための基盤技術を確立する。耐熱合金切削に対して10倍以上の高能率を目標とする。



cc/min  
100  
50  
0

約10倍

超硬ミリング セラミックミリング  
Fig. 加工能率



非最適化工具      最適化工具



Cutting resistance, N

Tool path distance, m

高靱性化により寿命まで欠損が生じない



Notch wear area, mm<sup>2</sup>

Cutting length, m

境界摩擦係数 1/10

ワイヤロン系セラミック工具高靱性化による高能率切削

構成刃先の安定化による境界摩擦極小化

プロジェクト1

- プロジェクト概要
- プロジェクトリーダー挨拶
- グループ1
- グループ2
- ▶ グループ概要
- ▶ 研究テーマ
- ▶ 研究計画
- ▶ グループメンバー
- ▶ 研究成果
- グループ3
- 参加企業

科学技術コーディネータ紹介

イベント情報

「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト事業

ワーキンググループテーマ1 耐熱合金の高効率加工法の開発

ワーキンググループリーダー:名古屋工業大学 教授 糸魚川文広

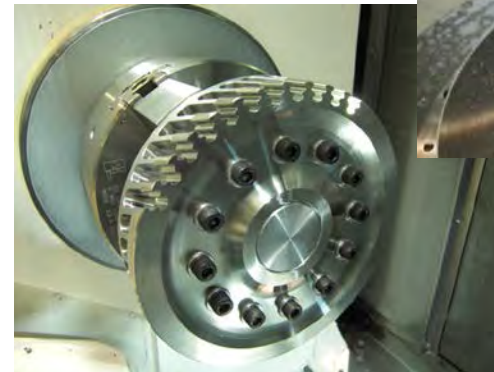
インコネルを素材とするジェットエンジン用耐熱合金部品の高効率加工を実現  
体的には、高性能セラミックミリング技術の開発、ロータリ切削による能率向上  
術、刃先形状の工夫による高効率切削技術を実現するための基盤技術を確認  
の高能率を目標とする。



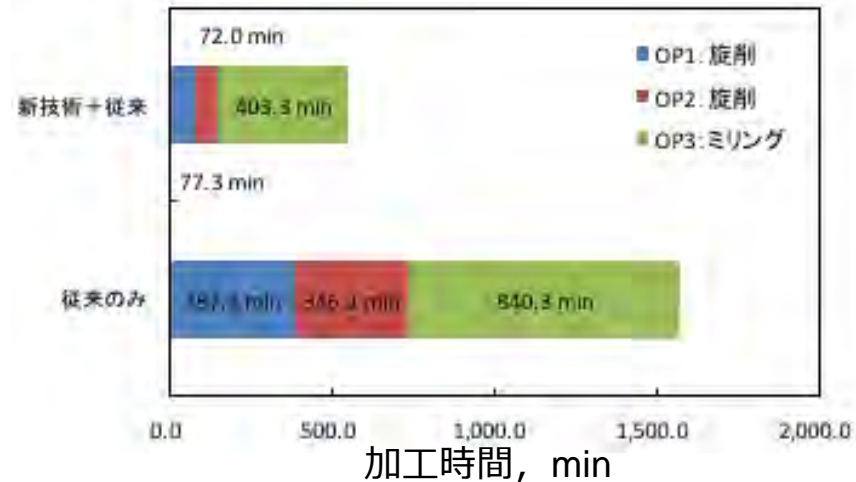
サイアロン系セラミック工具高靱性化による高能率切削

燃焼器・タービンディスク1/2モデルを**実際に製作**することにより、開発技術の性能実証試験および高能率化を評価

燃焼器ケース  
Inconel718  
(φ400xL600)



タービンディスク  
Inconel718  
φ250xL15

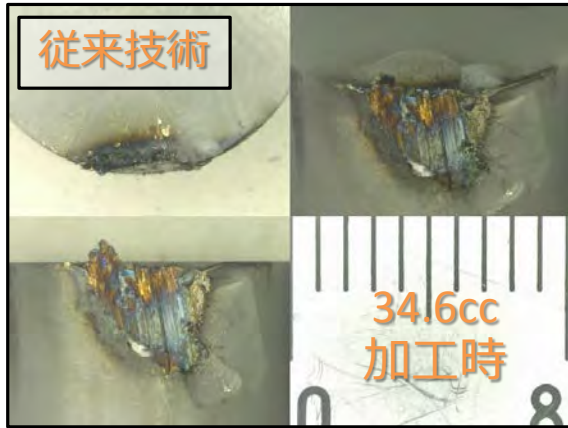


開発技術による燃焼器ケース加工の高能率化

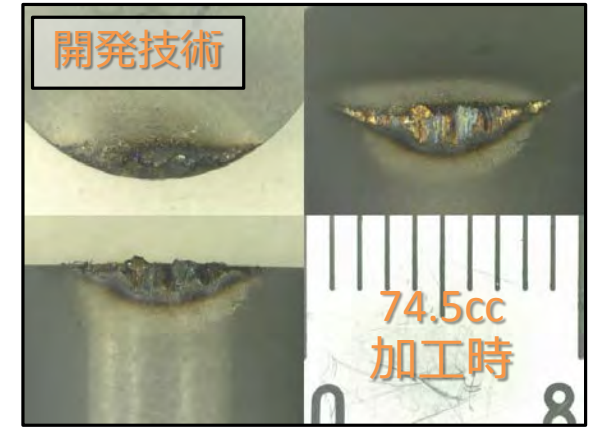
「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト事業

ミーリング加工の高能率化

■ 新規セラミック工具、およびホルダーの開発



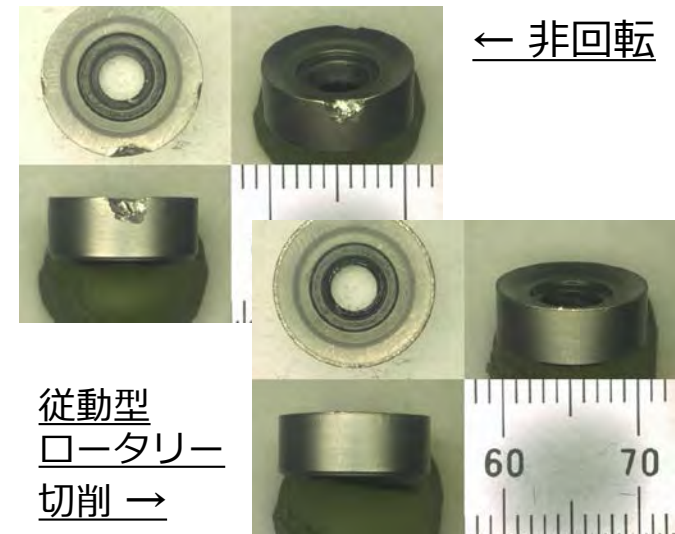
- フレーキングの抑制により刃先の後退, 逃げ面摩耗が減少
- 材料除去速度を倍増



■ 従動型ロータリーミーリング



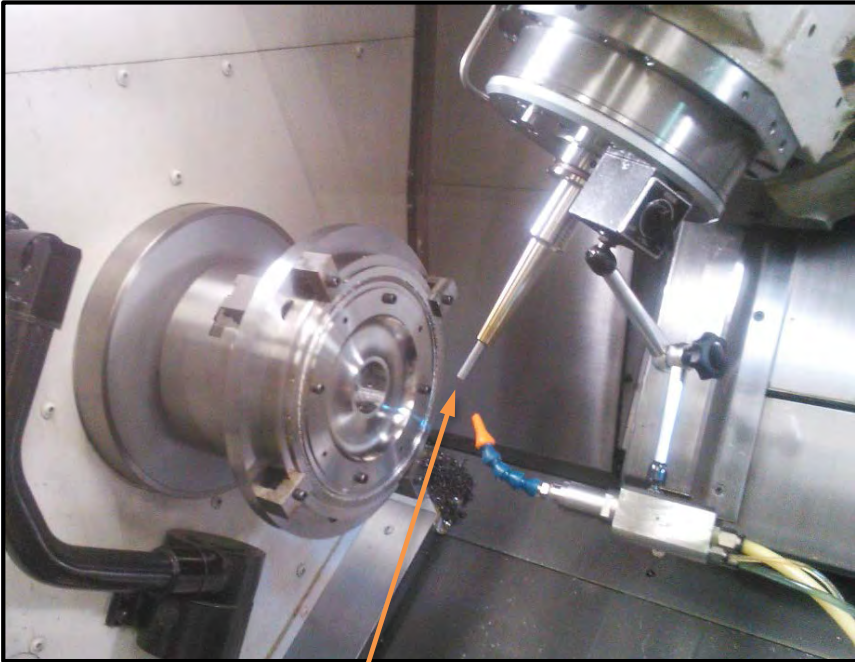
- 切削抵抗低下
- 切削温度低下
- 摩耗の分散



## 「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト事業

### 旋削加工の高能率化

#### ■ 複合加工機による高能率旋削加工



小径ソリッド円筒工具：

再研の容易さ，再研回数

焼き嵌めホルダ：

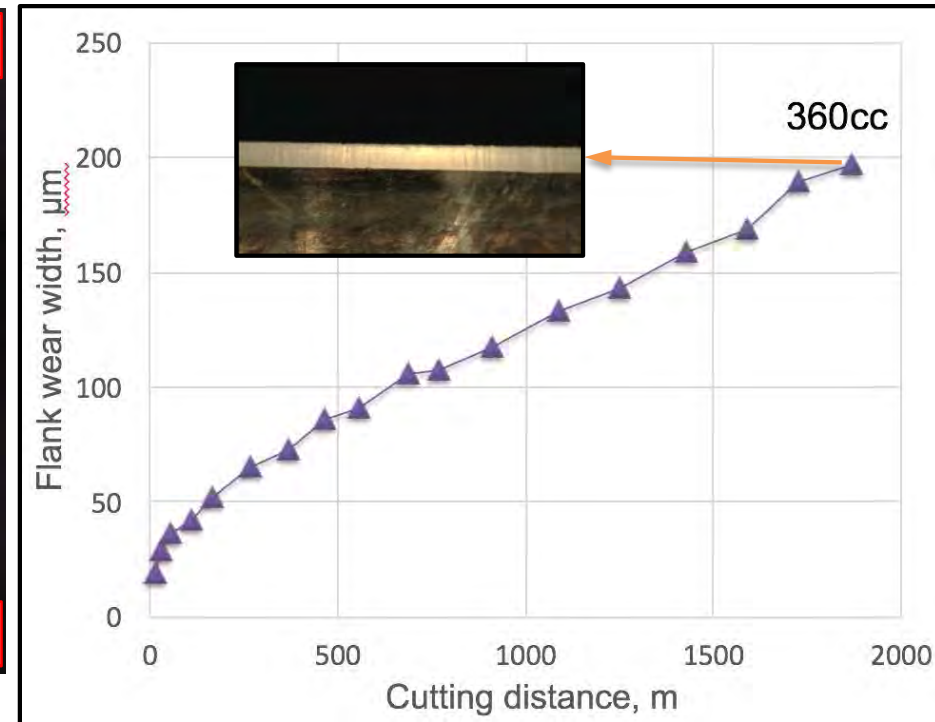
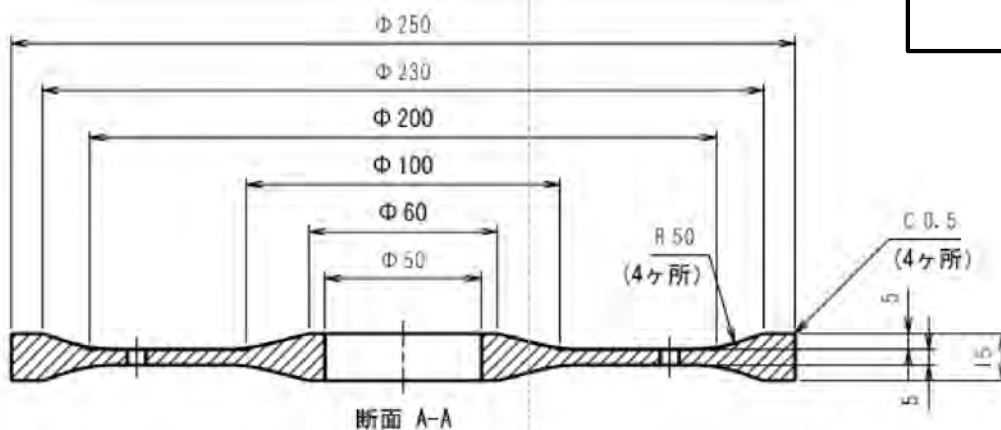
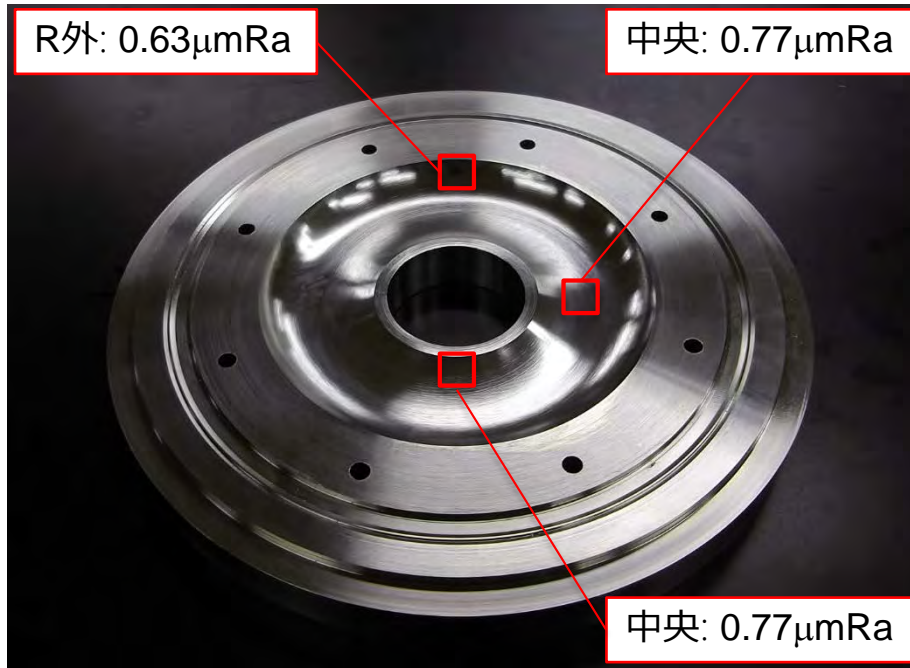
荒加工～仕上げ加工



## 「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト事業

## 旋削加工の高能率化

## ■ 複合加工機による高能率旋削加工



Tool: WC-Co  $\phi 10\text{mm}$   
 Depth of cut: 0.5mm  
 Feed rate: 0.4mm/rev  
 Cutting speed: 50m  
 Tool circumferential velocity: 2m



## 「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト事業

## 旋削加工の高能率化

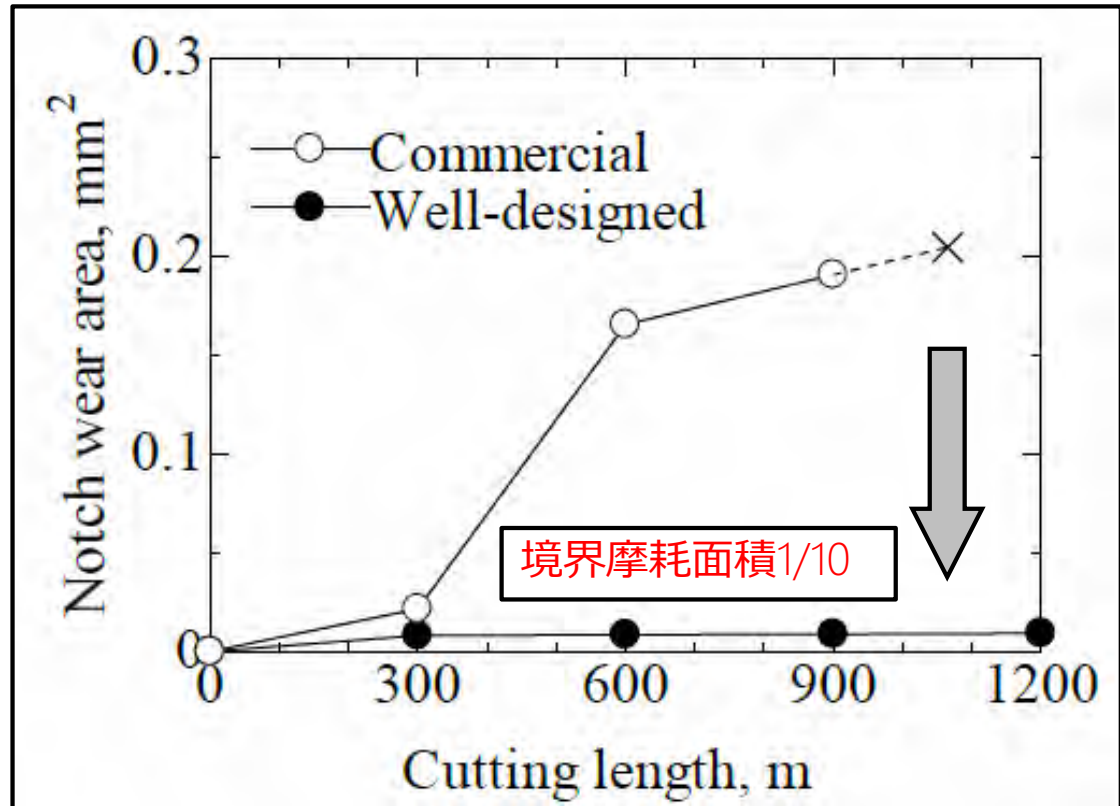
- cBNインサートを用いた高速旋削加工 — 工具形状最適化による境界摩耗, 欠損の抑止



Commercial insert  
(非最適化工具)



Well-designed insert  
(最適化工具)



Cutting speed: 150 ~ 250 m

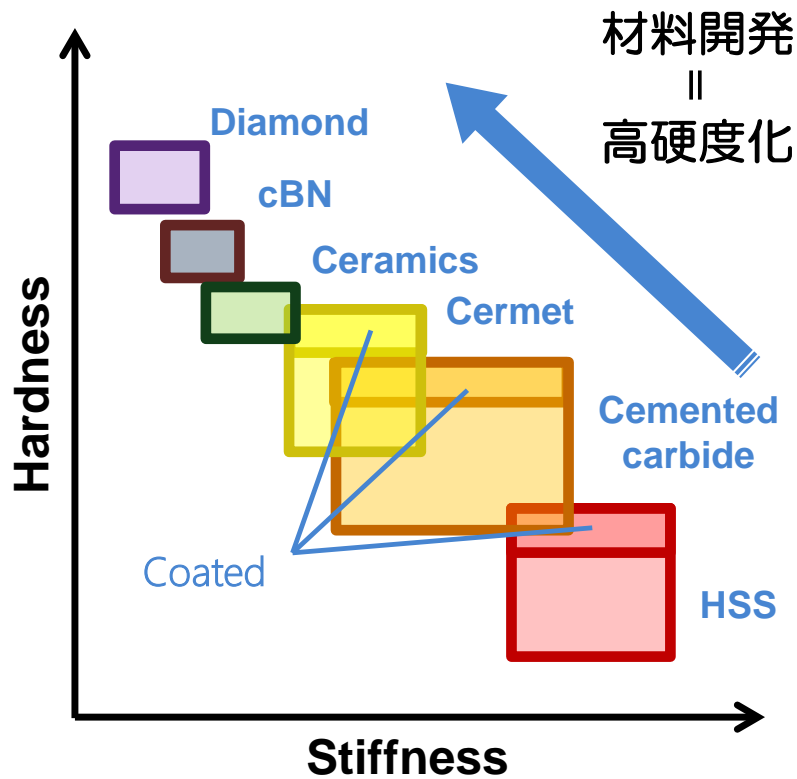
Feed rate: 0.1 mm/rev

Depth of cut: 2 ~ 2.5 mm

耐熱合金旋削：工具刃先形状最適化による境界摩耗・欠損抑止

■ 耐熱合金旋削：工具刃先形状最適化による境界摩耗・欠損抑止

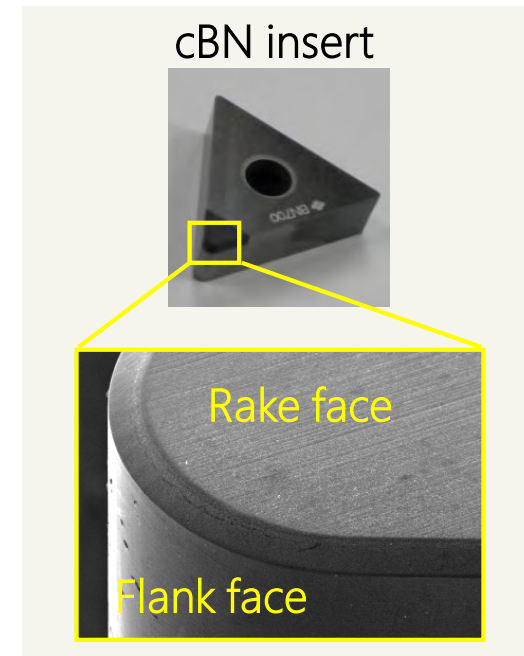
工具材料開発とその特性



高硬度化に伴い欠損リスク増加

高硬度な材料は靱性に劣り成形性も低い  
ため、鋭利な刃先は実現しにくい。

▶▶ ネガランド，ホーニング

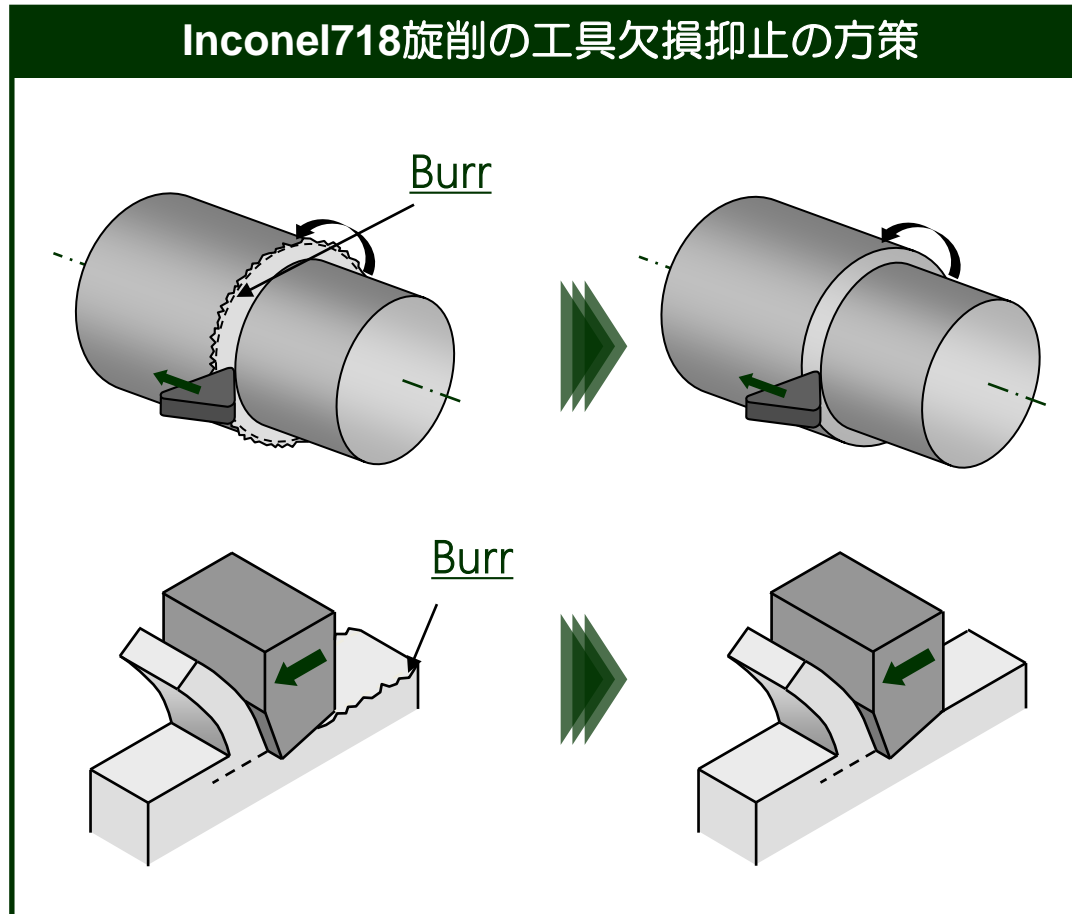


ネガランドとホーニングの付与による耐欠損性の担保



切れ味(Cutting ability)の担保  
Edge force, Thrust force 増加抑制

- 耐熱合金旋削：工具刃先形状最適化による境界摩耗・欠損抑止



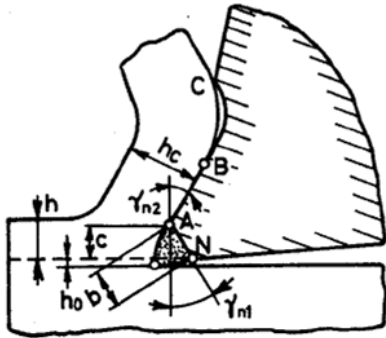
Inconel718旋削時の境界摩耗・欠損は切れ味低下によるバリ生成が主要因

耐欠損性を担保しつつ「切れ味」を向上させる方法はあるか？

## ■ 耐熱合金旋削：工具刃先形状最適化による境界摩擦・欠損抑止

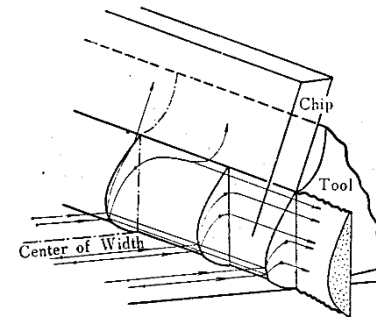
### チャンファ下に生じた構成刃先の側方流動現象の利用

構成刃先の積極利用



[ 出典：星ら, 金属切削技術, 工業調査会 (1961) 69. ]

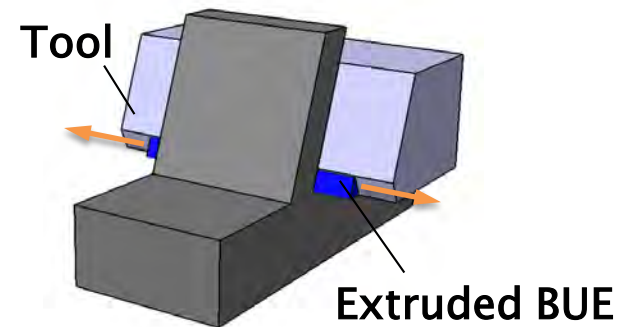
構成刃先の側方流動現象



[ 出典：白井ら, 精密機械, 30, 350 (1964) 273. ]

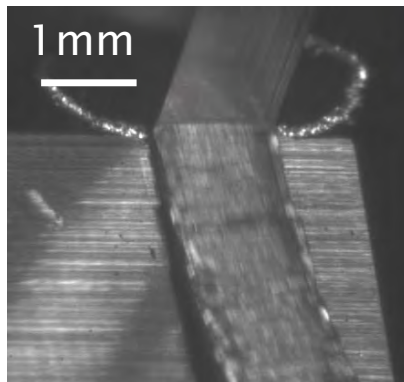
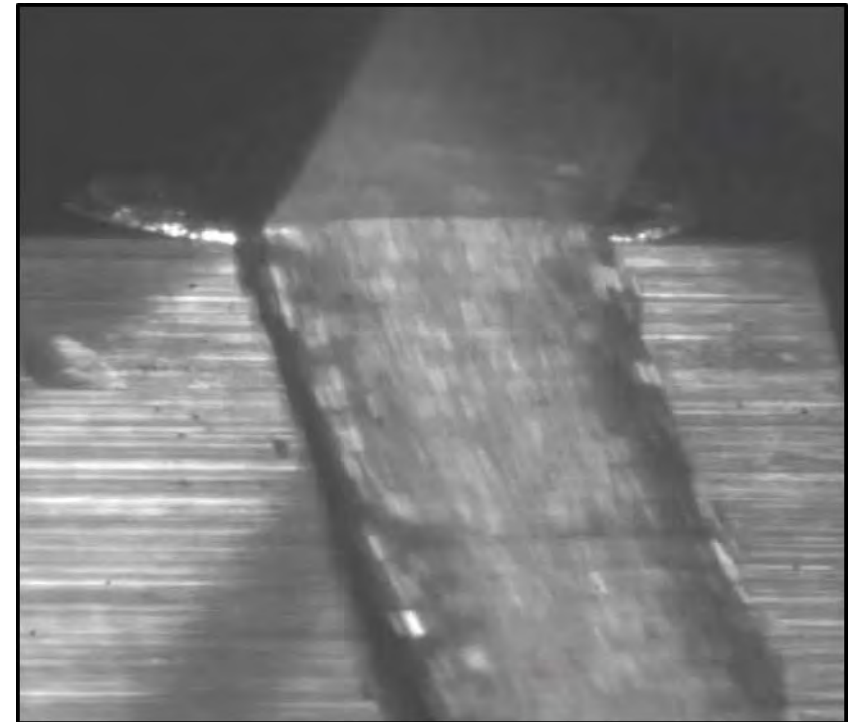
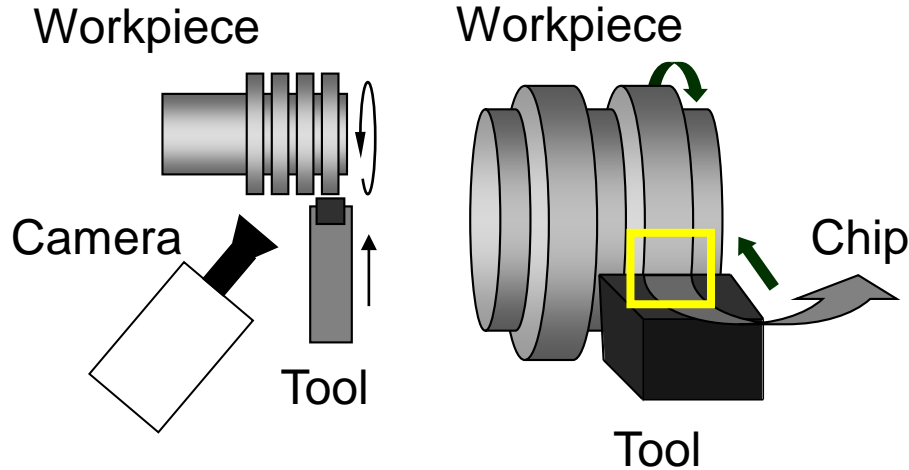
## 切削幅全体にわたる切れ味の向上

- 工具刃先の強度は大きく低下しない
- 切れ刃全体にわたり切れ味が向上
- 工具と構成刃先は滑り摩擦状態で固着・剥離による欠損抑止

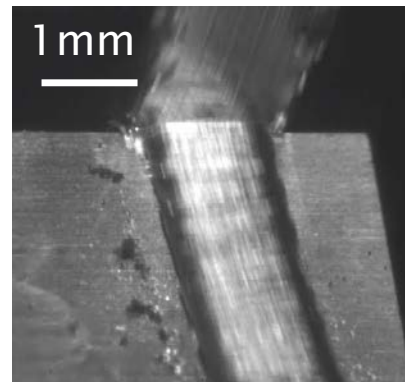


- 耐熱合金旋削：工具刃先形状最適化による境界摩耗・欠損抑止

## 2次元切削による検証



Well-designed insert  
(最適化工具)

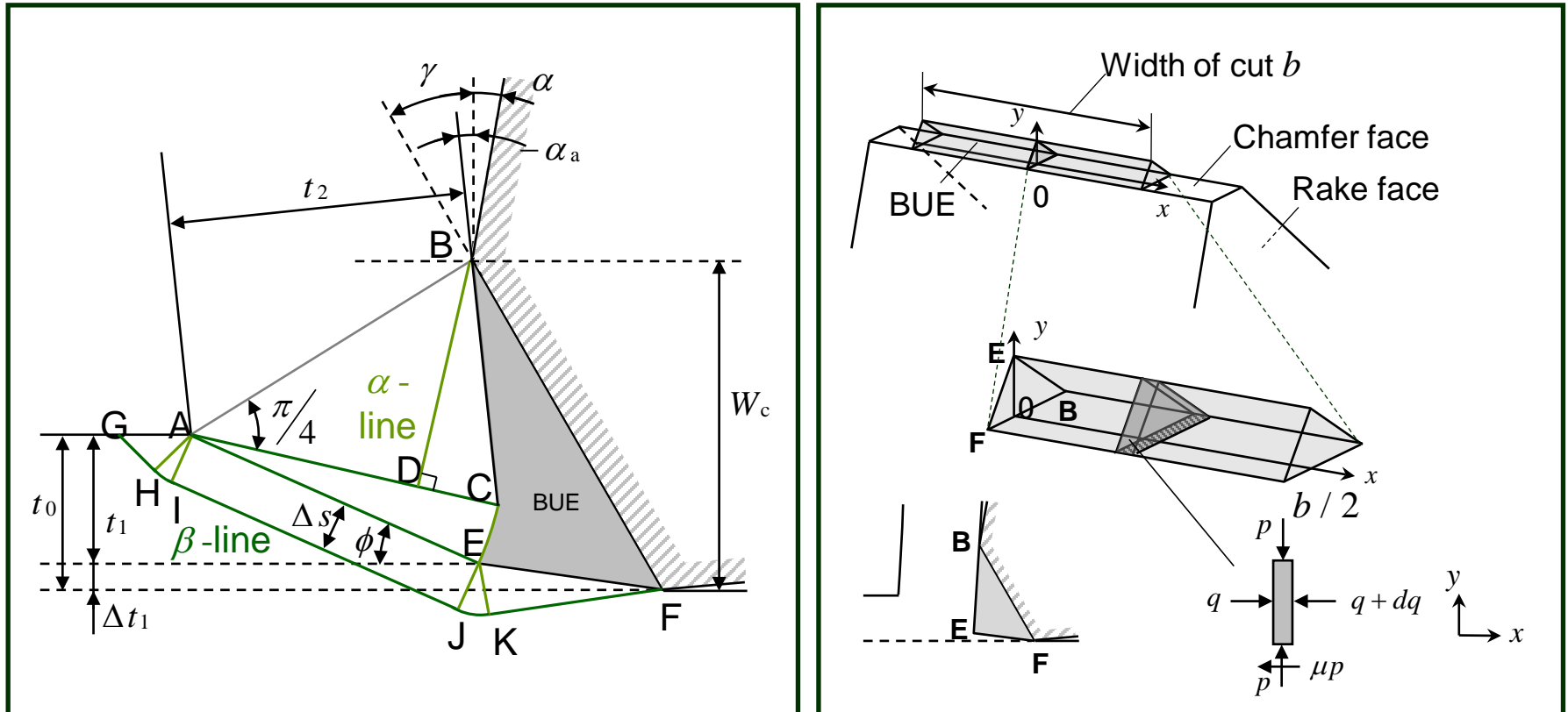


Commercial insert  
(非最適化工具)

- 連続的な構成刃先側方流動
- 構成刃先の固着抑止
- 仕上げ面のバリ抑止

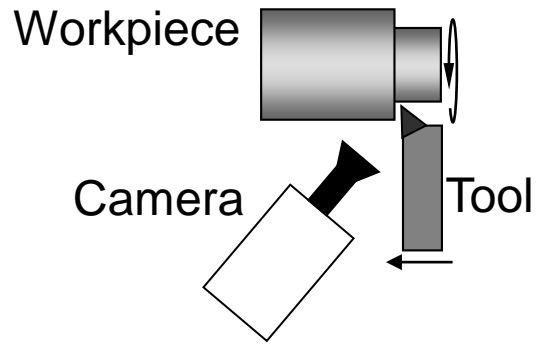
## ■ 耐熱合金旋削：工具刃先形状最適化による境界摩耗・欠損抑止

### カ学モデルによる刃先形状設計

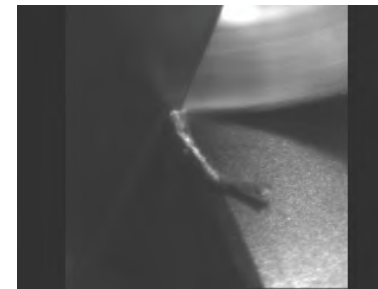


すべり線場から算出されるBUEの静水圧と、スラブ法による中心部静水圧が一致するように実質すくい角 $\alpha_a$ を決定

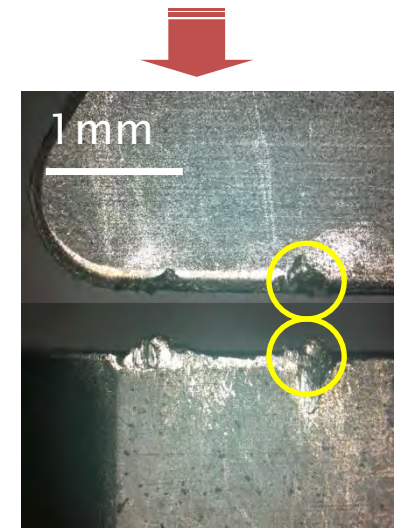
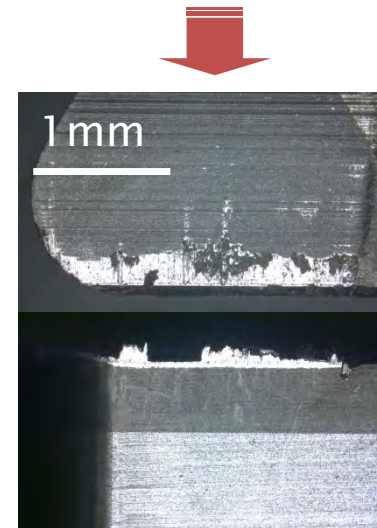
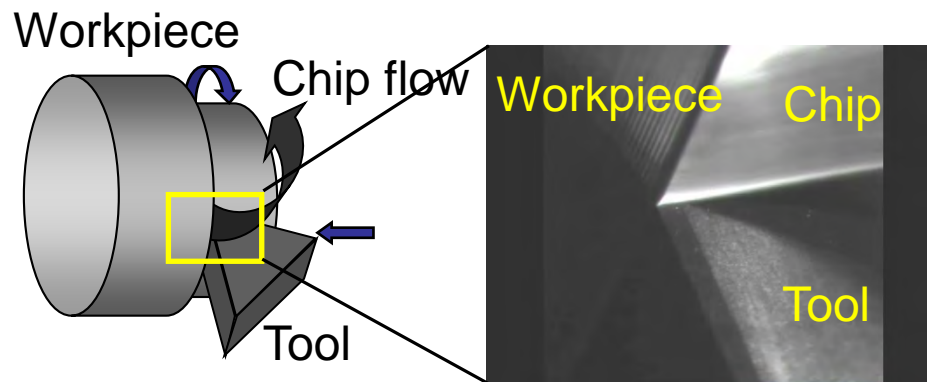
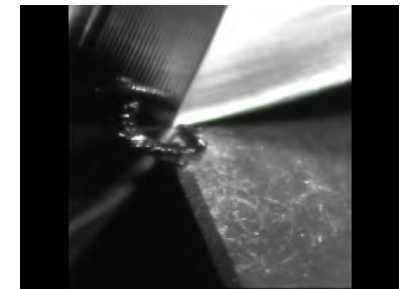
- 耐熱合金旋削：工具刃先形状最適化による境界摩耗・欠損抑止  
外周旋削による検証



Well-designed insert  
(最適化工具)



Commercial insert  
(非最適化工具)



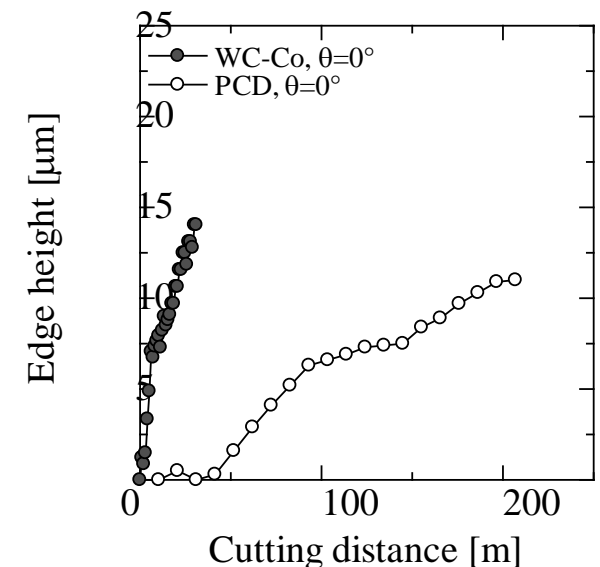
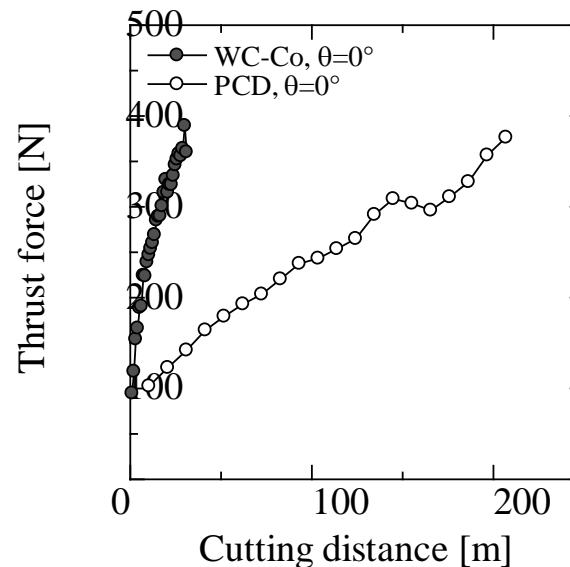
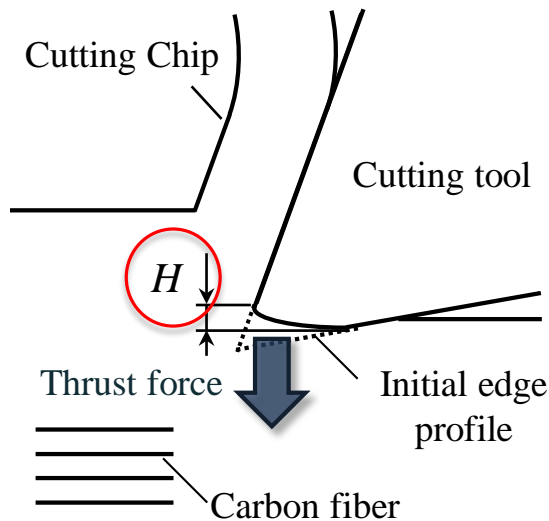


# CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

### C-FRP切削における工具摩耗

炭素繊維による刃先の鈍化・激しい逃げ面摩耗 → 急激なスラスト増加  
 → デラミネーション → 加工品質劣化



高耐摩耗性材工具：スラスト増加速度を低減するが、単調な増加傾向を抑えることはできない。

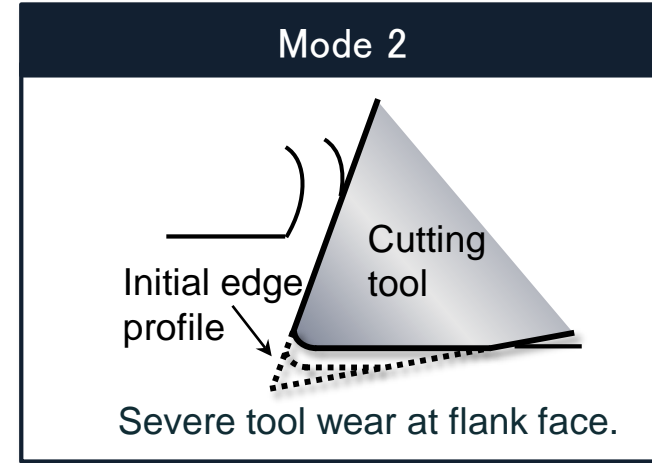
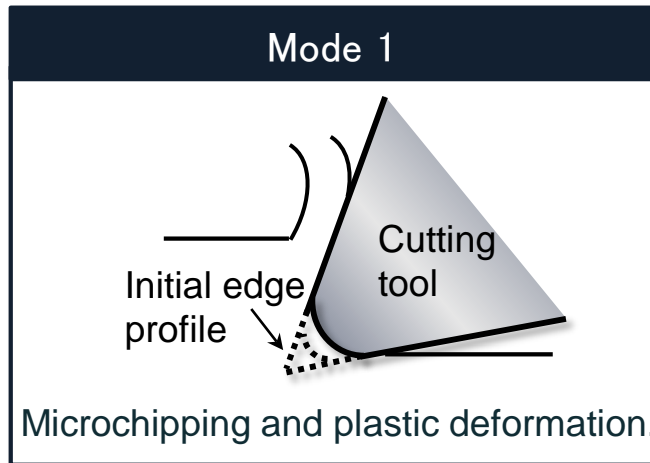
刃先先端位置(高さ: $H$ )の変化とスラストに相関が見られることから、刃先先端位置の変化を抑止する工具刃先設計が可能であれば、摩耗はしてもスラスト増加を抑止することが可能

## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

### C-FRP切削の工具摩耗形態

- |           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 刃先の鈍化     | — | 切れ刃先端高さの増加 |
| 逃げ面の激しい摩耗 | — | 刃先先端高さの減少  |

## ■ CFRPの切削加工における工具刃先の損傷形態



## ■ セルフシャープニング効果

- CFRP切削に特有のアブレシブ摩耗を積極的に利用し，工具すくい面側の摩耗量よりも逃げ面側の摩耗量を相対的に大きくすることで，被削材の除去と刃先の研磨を同時に実現

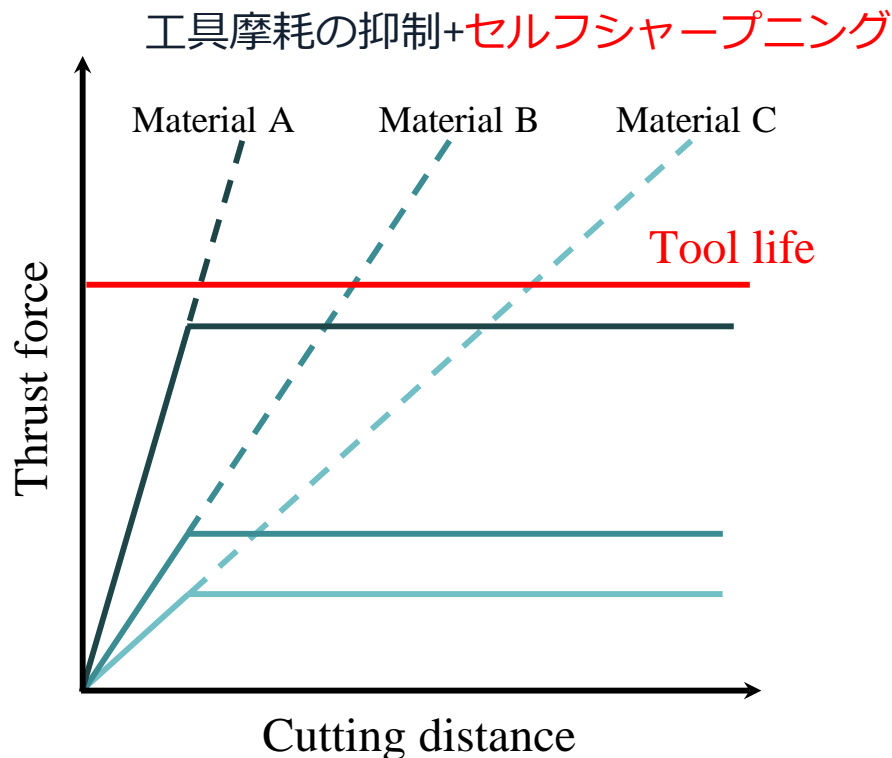
## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

### C-FRP切削工具設計コンセプト

摩耗を積極的に利用して切れ味を維持（スラスト増加抑止）する

#### 工具刃先のセルフシャープニング

逃げ面摩耗を積極的に利用し、切れ味の低下を抑制



#### ■ 工具摩耗

##### Demerit

- 切れ味の低下に伴う、加工力の増加

セルフシャープニングの利用

##### Merit

- 切れ味低下の抑制

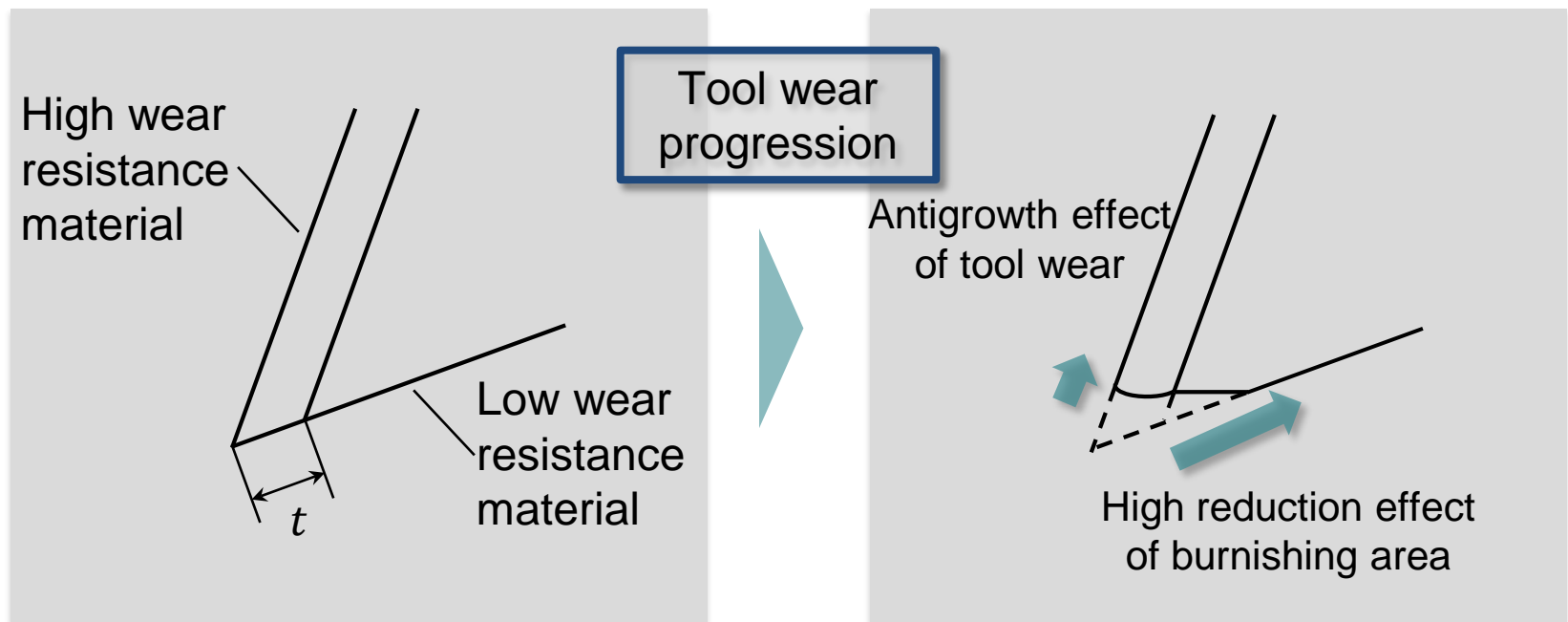
CFRP切削工具の長寿命化を実現

## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

### C-FRP切削工具設計コンセプトの実現

#### ■ 刃先近傍へ硬さ分布を付与した2層切削工具

- 工具すくい面側に硬質層を有し、逃げ面側はそれよりも軟質な（耐摩耗性に劣る）母材によって形成



## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

### 検証実験 — 切削方法

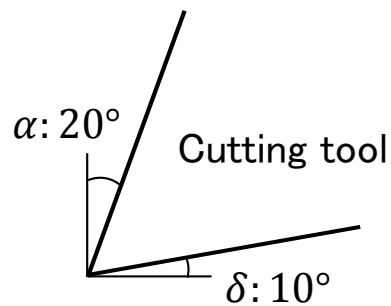
#### ■ CFRPのミリング切削試験

#### ■ 切削条件

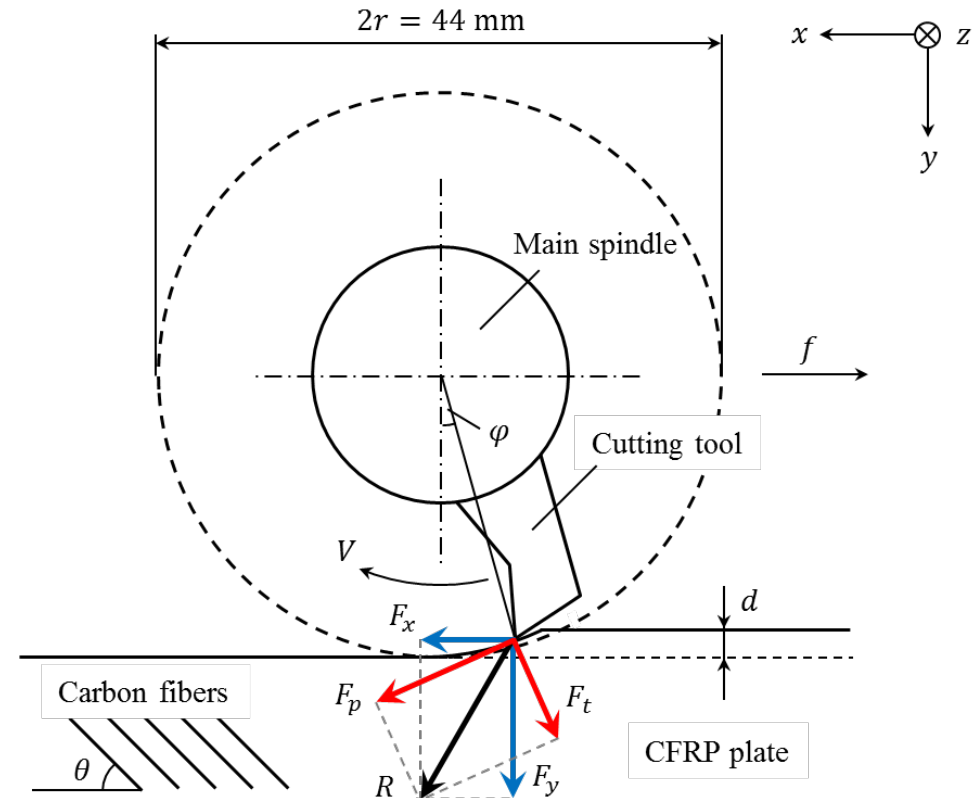
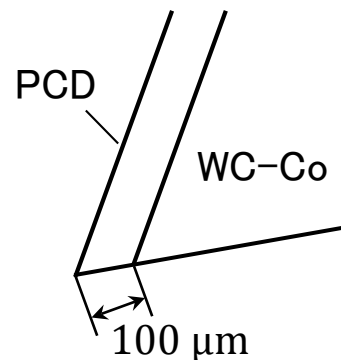
Cutting speed	30.0 m/min
Feed rate	0.050 mm/rev
Radial depth of cut	2.0 mm
Cutting direction	Down cut
Fiber orientation	0°

#### ■ WC-Co工具

#### ■ PCD工具

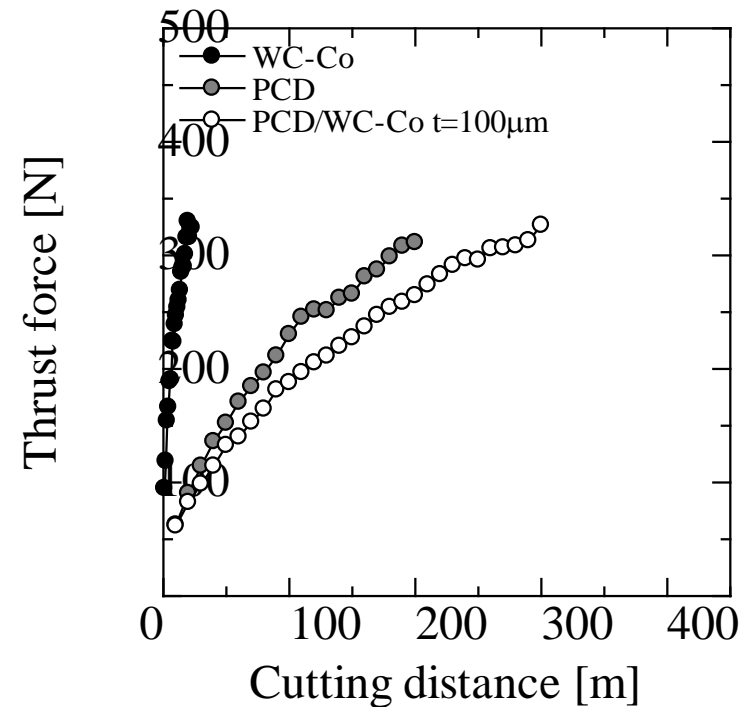
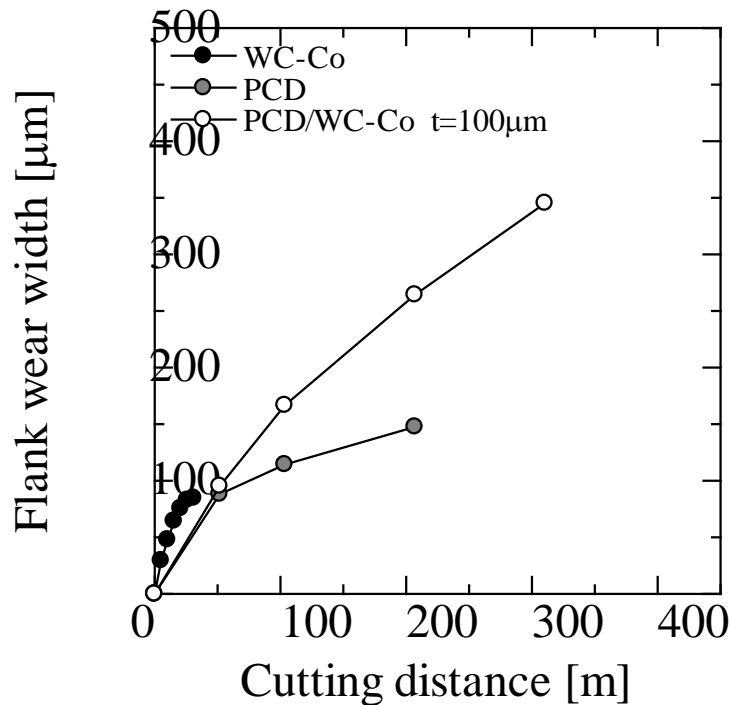


#### ■ PCD/WC-Co工具



## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計 検証実験結果1 — 逃げ面摩耗とスラスト

### ■ 逃げ面摩耗量および背分力の推移

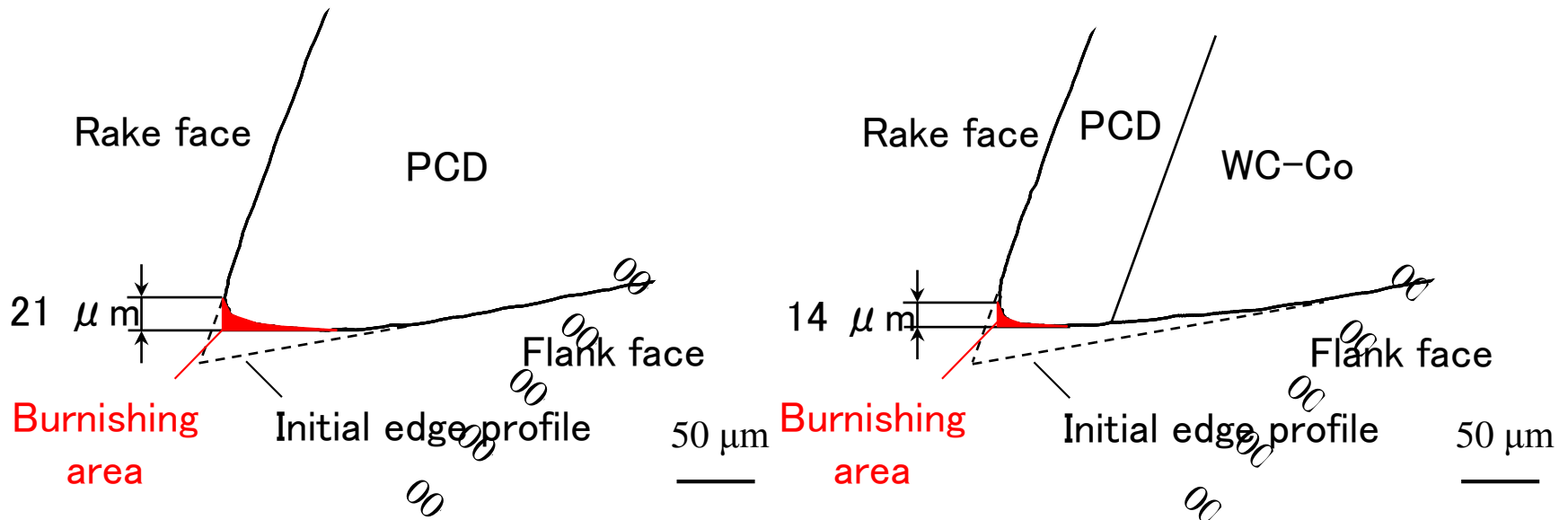


- 2層工具の逃げ面摩耗量は、切削距離 50mで超硬層まで進行
- 超硬層まで逃げ面摩耗が進行すると、2層工具の加工力の増加が抑制
- 同切削距離で比較すると、2層工具の加工力はPCD工具よりも25%減少

## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

### 検証実験結果1 - 工具プロファイル

#### ■ 工具刃先のプロファイル（切削距離200 m）



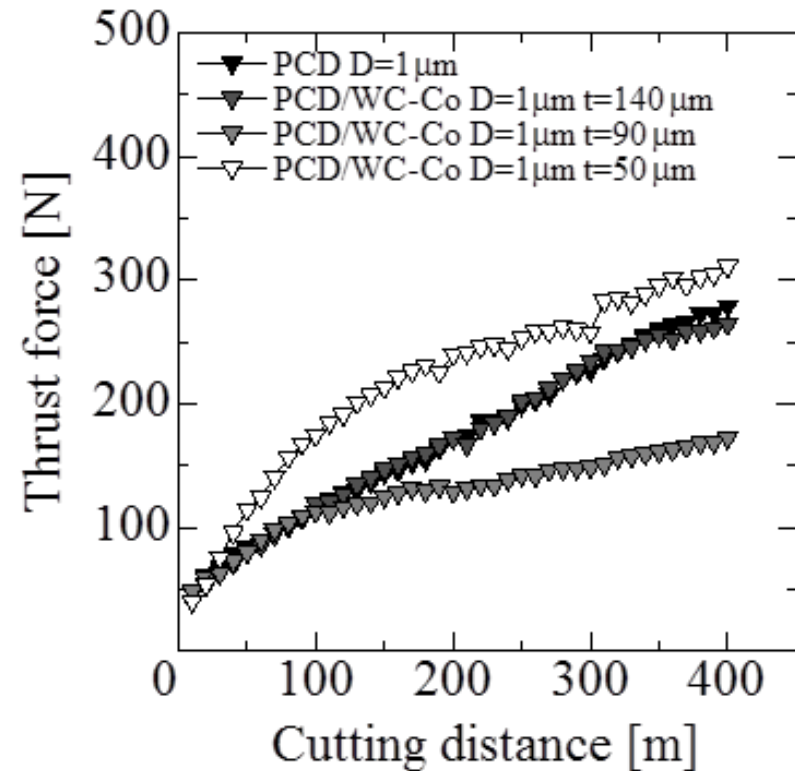
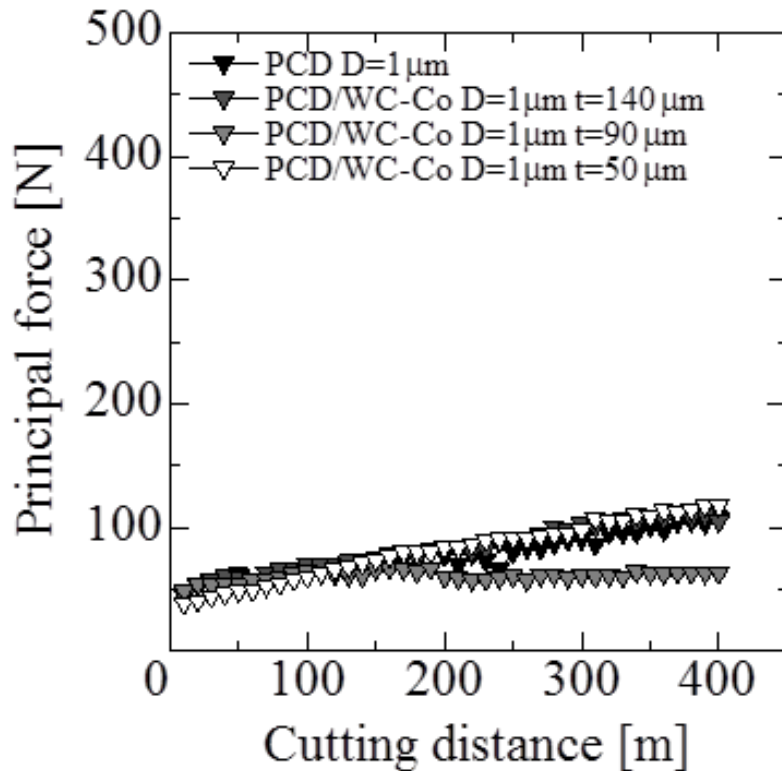
- CFRPの切削加工では，摩耗の進行によりバニシ領域が形成される
- 2層工具では，耐摩耗性に劣る超硬が優先的に摩耗することで，セルフシャープニング効果が発現しバニシ領域の拡大が抑制される  
 → 加工力の増加が抑制された



## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

### 検証実験結果3 — 硬質層 (PCD) 厚さの最適化

#### ■ 加工力の推移

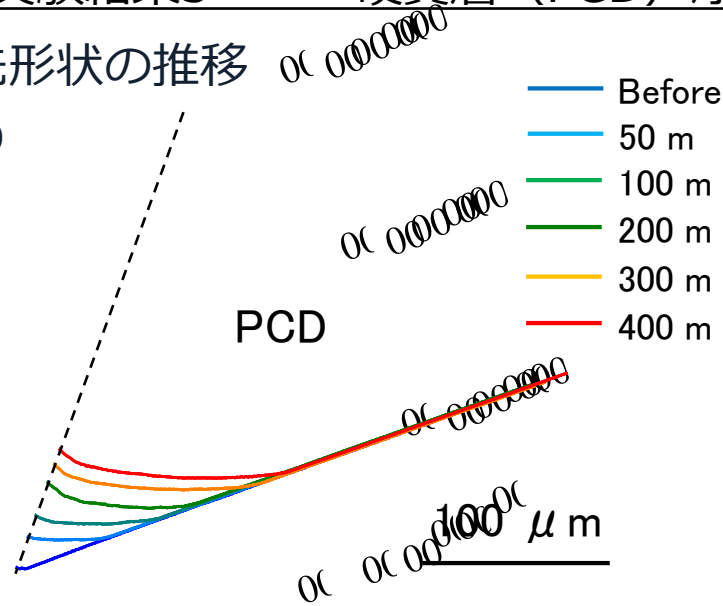


## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

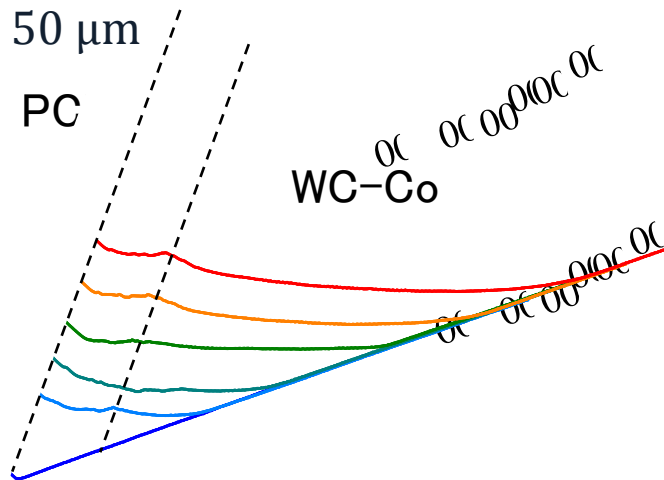
### 検証実験結果3 — 硬質層（PCD）厚さと刃先プロファイル

#### ■ 刃先形状の推移

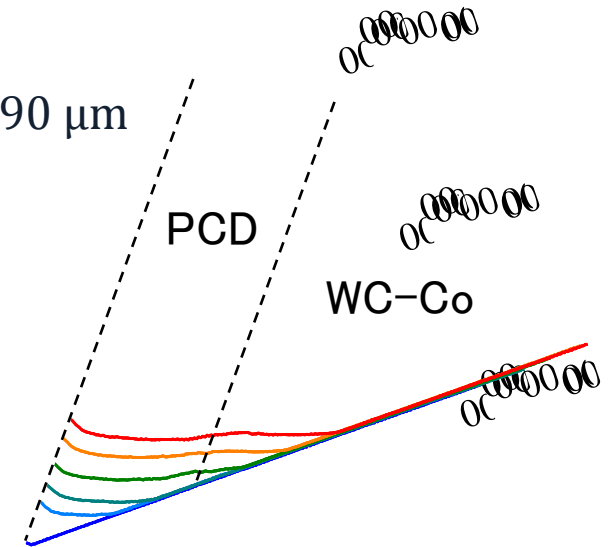
#### ■ PCD



#### ■ $t = 50 \mu\text{m}$

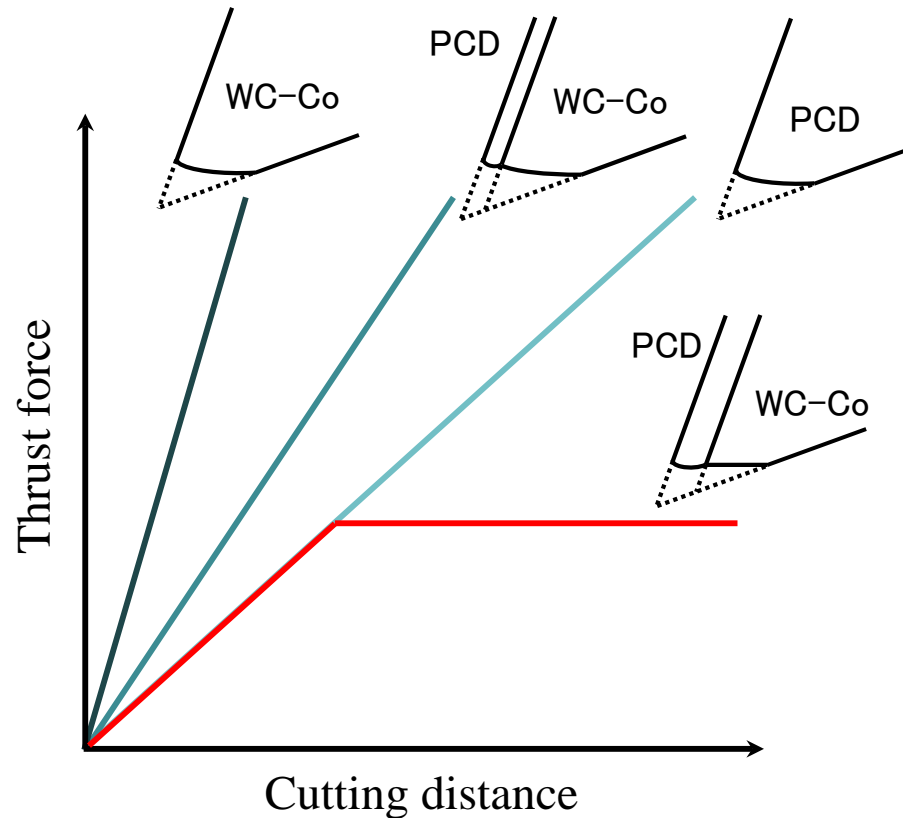


#### ■ $t = 90 \mu\text{m}$



- 90 $\mu\text{m}$ は、セルフシャープニング効果により、バニシ領域が小さい
- 50 $\mu\text{m}$ の場合、PCD工具と比べてバニシ領域は大きい
  - PCD層の強度が低下し、セルフシャープニング効果は発現しない

■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計  
検証実験結果のまとめ



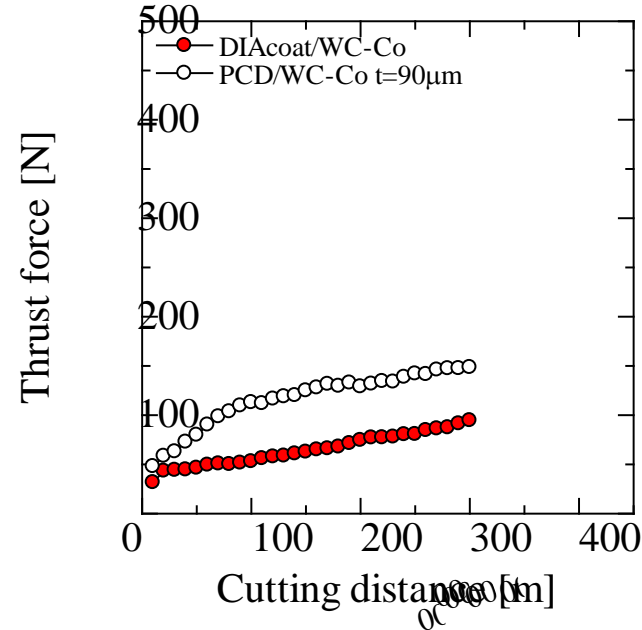
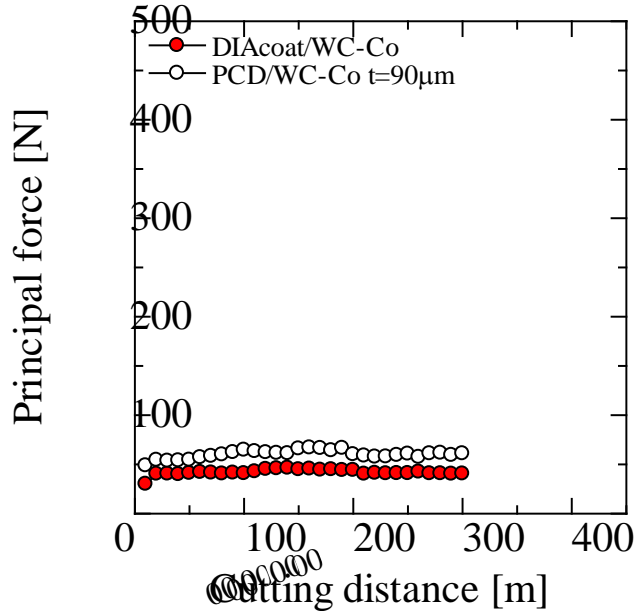
最適化された2層工具により，スラストの増加を抑止したCFRP切削が可能となる

■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計

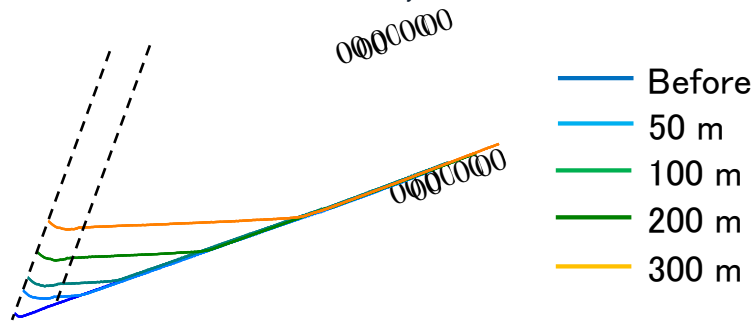
さらなる性能向上 – CVDダイヤモンドコーティング工具の2層工具化

■ CVDダイヤモンドコーティング工具の2層工具化

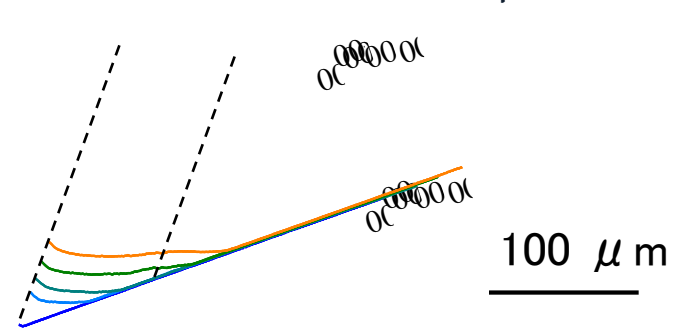
■ 加工力



■ DIA/WC-Co工具 (t = 20 μm)

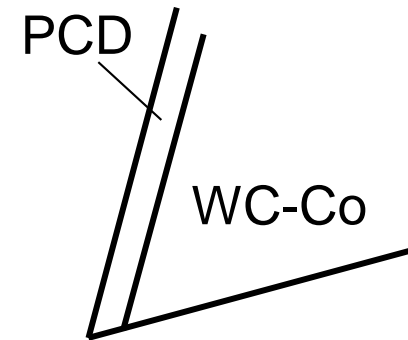
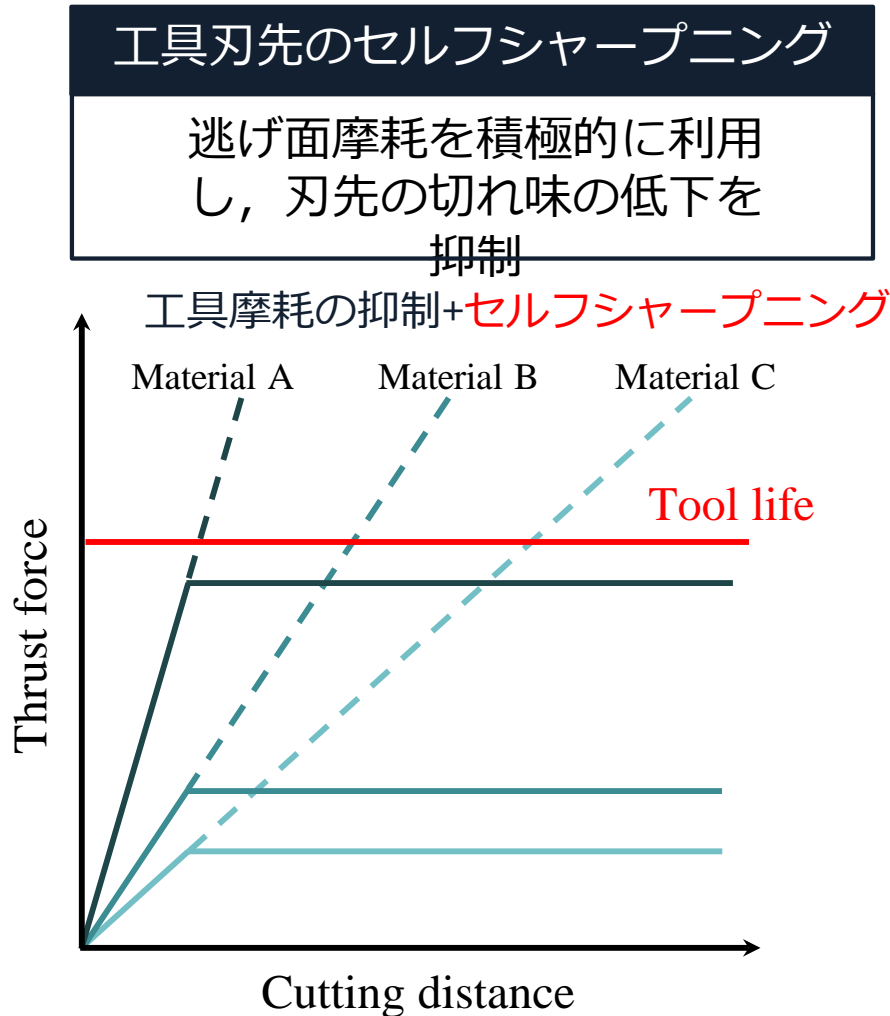


■ PCD/WC-Co工具 (t = 90 μm)



## ■ CFRP切削：スラスト増加を抑止する工具設計 まとめ

### ■ 長寿命化を目指した新しいコンセプト



- 逃げ面摩耗を積極的に利用することで、切れ味の低下が抑制されることを実証した

### ■ 2層切削工具の設計指針

- 逃げ角を大きくする
- 硬さ比を大きくする
- 硬質層厚みを最適化する

高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形法  
— Pulse Laser Grinding(PLG)

- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
短パルスレーザー加工

- 高パワー密度

$10^{10}\text{W}/\text{cm}^2\sim$

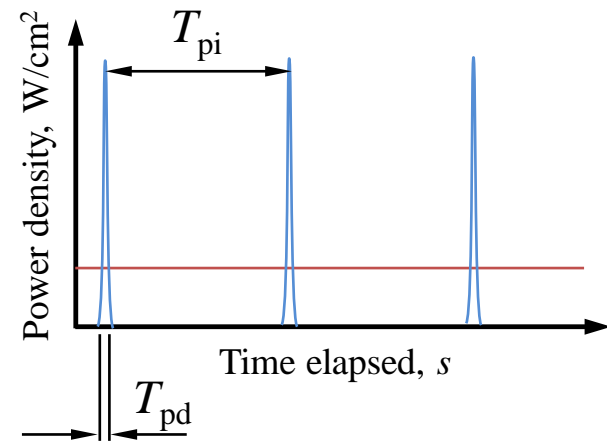
非熱加工(Laser ablation)

多光子吸収

損傷閾値低下

- 低トータルフルーエンス

低材料除去速度



短パルスレーザーの利点をいかしたマニファクチャリング技術開発

- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— Pulse Laser Grinding(PLG)  
短パルスレーザー加工による工具成形

## 切削加工

- Advantages
  - 高除去効率(除去体積/消費エネルギーが小さい)
  - 高寸法精度加工(工具体積変化/被削材体積変化)
- Disadvantages
  - 低靱性工具(高硬度のため)
  - 工具材料欠陥(欠け, 粒子脱落：低成形性のため)

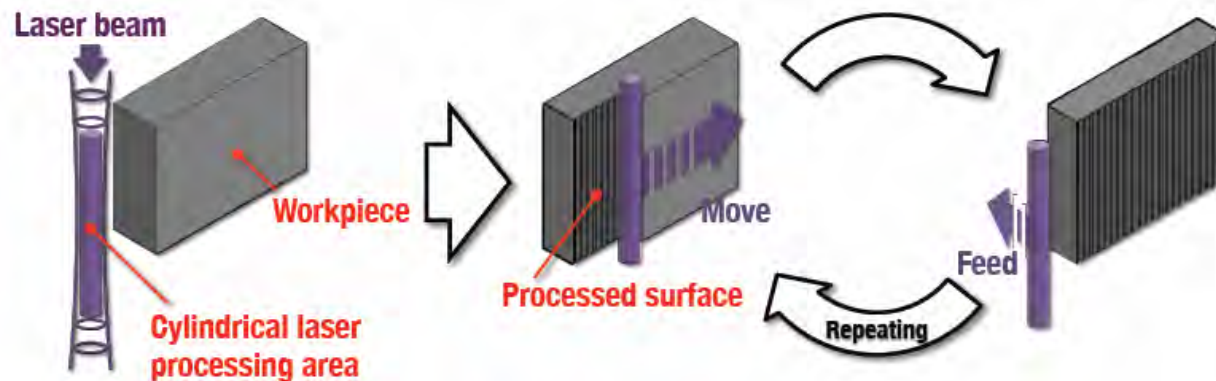
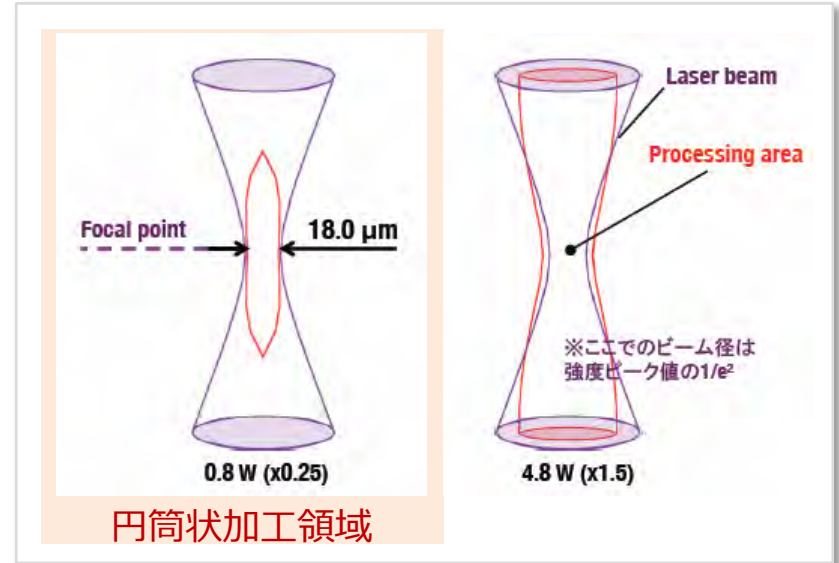
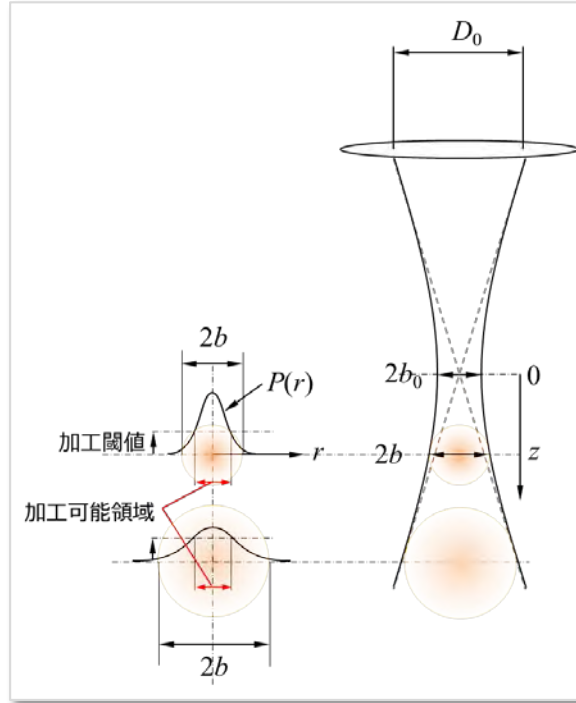
## 短パルスレーザー加工

- Disadvantages
    - 低除去効率(フルーエンスが小さい)
    - 低寸法精度加工(回折限界・収差)
  - Advantages
    - 低損傷(非熱加工, 非接触加工)
    - 低加工負荷(非接触加工)
- 解決策は? ←
- 研削の代替
- 工具成形加工程度の除去効率担保 ○
-



- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)

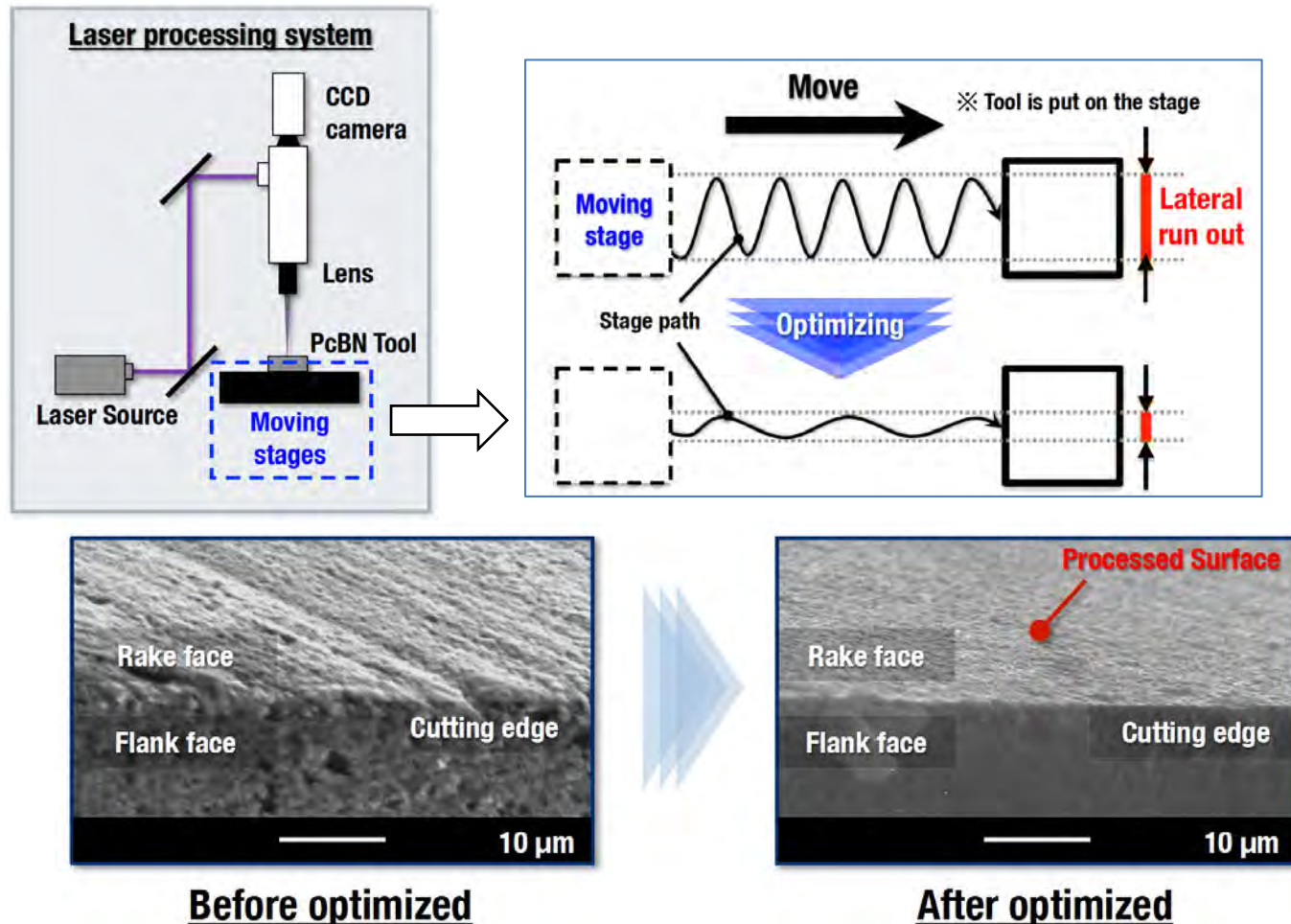
## Pulse Laser Grinding(PLG)



- 円筒移動の包絡線が形状を決定
- パルス毎の加工形状には依存しない
- 加工閾値付近の穏やかな加工面の集積による表面

- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— Pulse Laser Grinding(PLG)

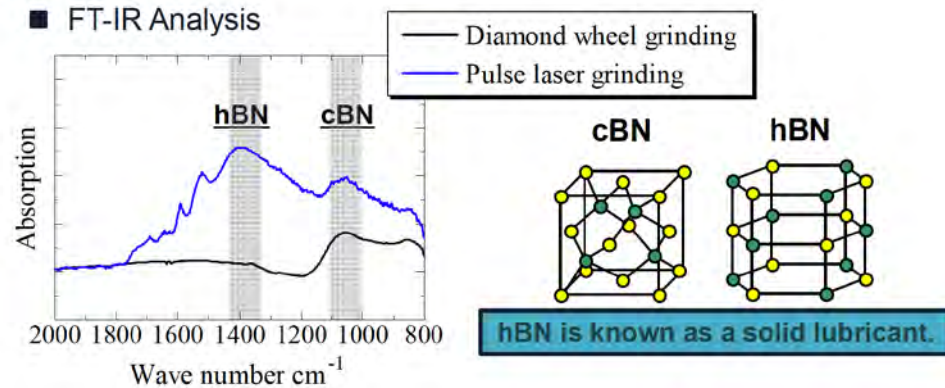
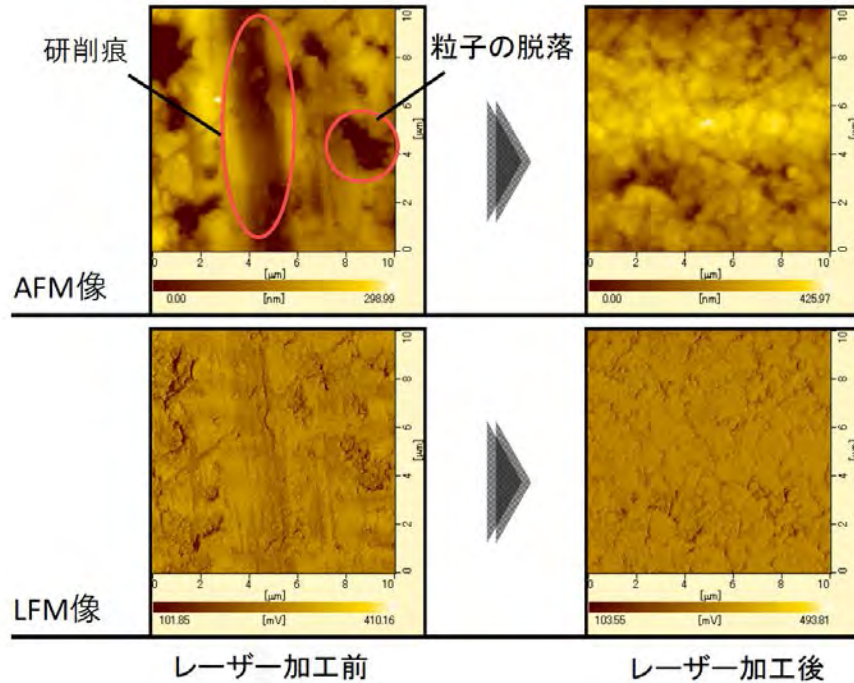
## PLGによる高精度刃先成形



加工抵抗がほぼ0であることから，加工システムの精度を担保すれば高精度切れ刃が得られる。

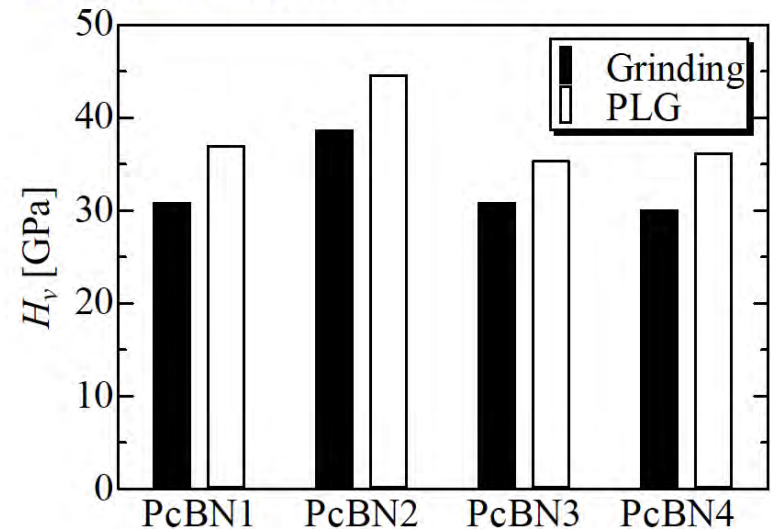
# ■ 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— Pulse Laser Grinding(PLG)

## PLGによる高精度・低損傷表面の創製



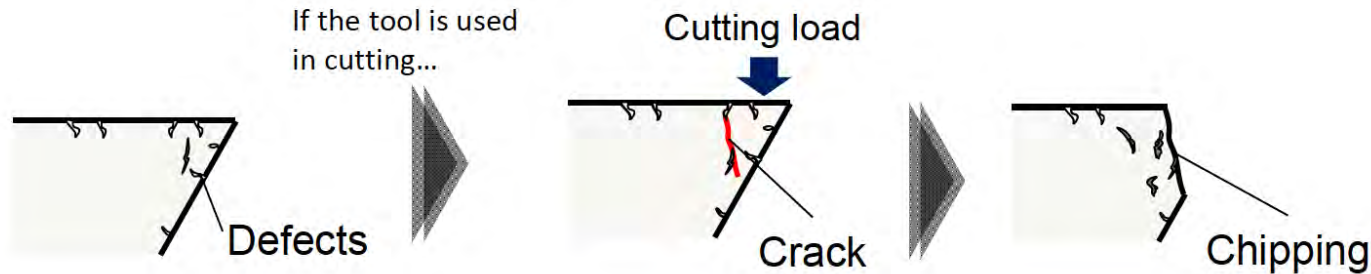
- 表面欠損(粒子脱落, 擦過痕)の無い表面
- 見かけ硬さの増加
- 硬質マトリックス上への低摩擦層の創製

### ■ Surface hardness

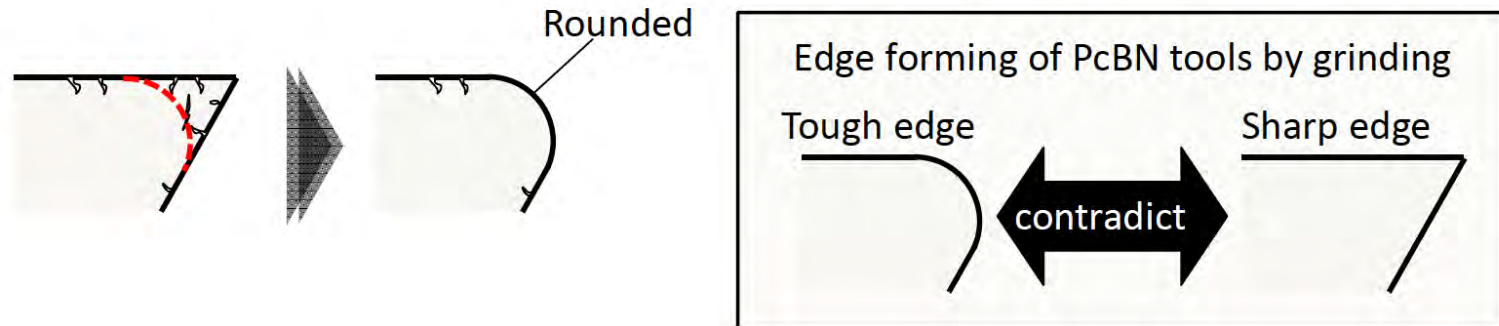


■ 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
PLGによる刃先成形工具による低損傷シャープエッジ創製

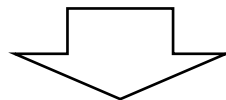
■ 研削による刃先の成形



■ ホーニングによる刃先の成形



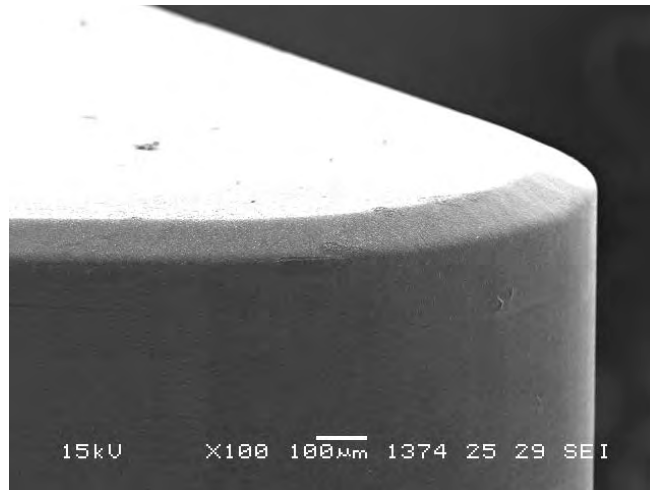
PLGではホーニングによる欠損抑止を必要としない



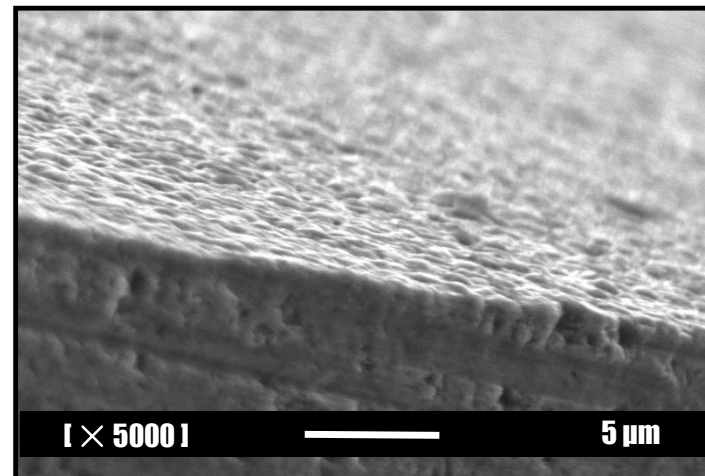
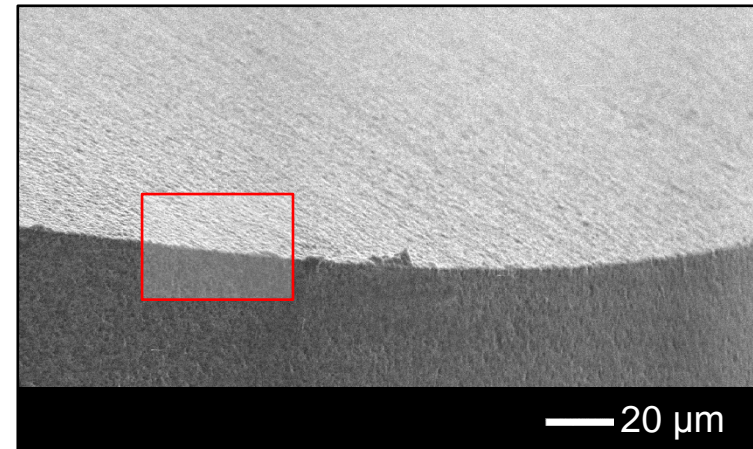
cBN等の硬高脆工具で耐欠損性の高いシャープエッジを使用できる

- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
PLGによる刃先成形工具による低損傷シャープエッジ創製

市販PcBN工具



PLGにより仕上げたPcBN工具



- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
PLG成形cBNの耐欠損性・耐エロージョン性向上

- 成形時に欠陥が導入されにくい短パルスレーザー加工による刃先とダイヤモンド研削による刃先の比較

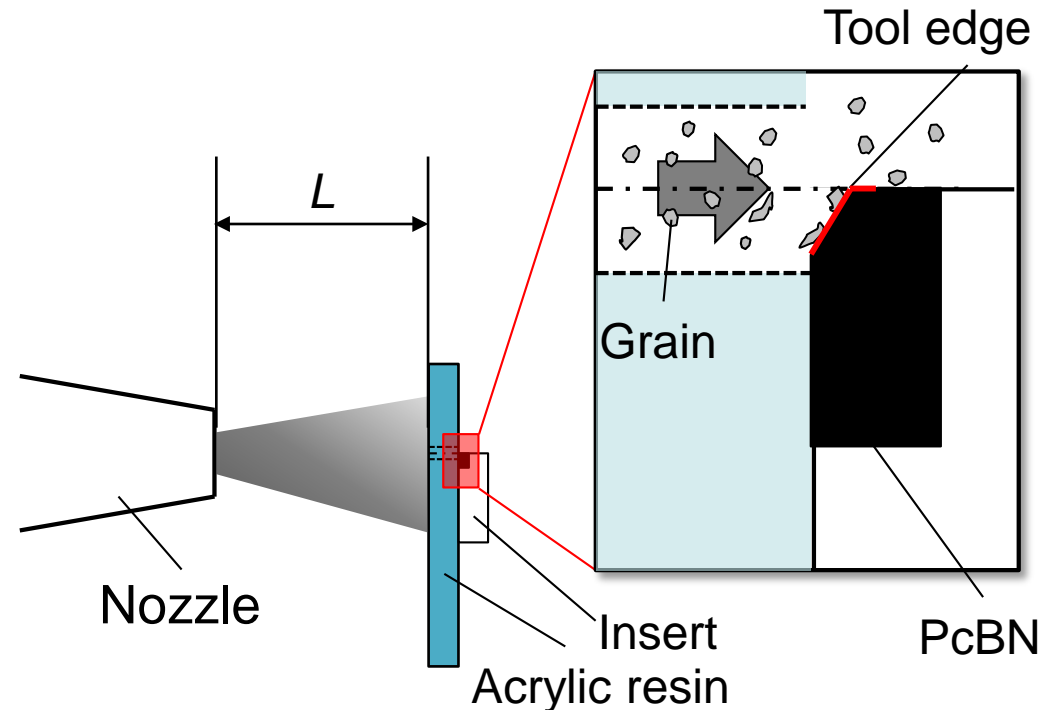
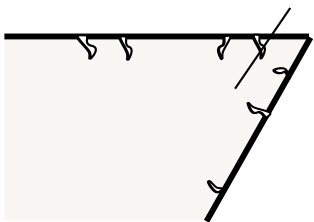
## Conditions

Abrasive grain	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Grain size	#60(212 – 250 μm)
Discharge pressure	0.4 MPa
Process time	3 sec
Distance <i>L</i>	450 mm

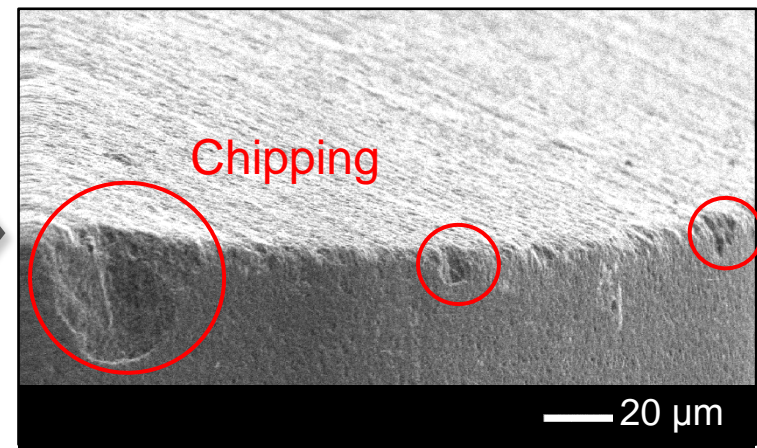
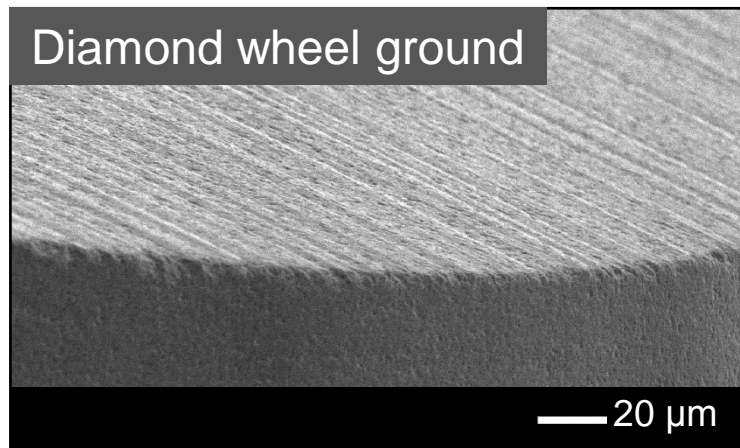
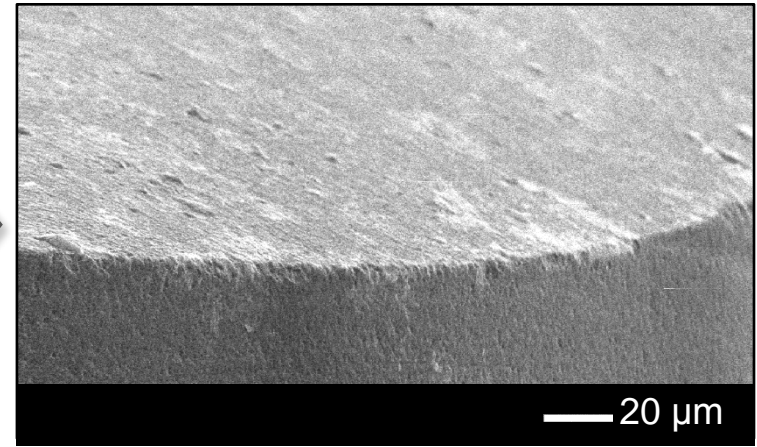
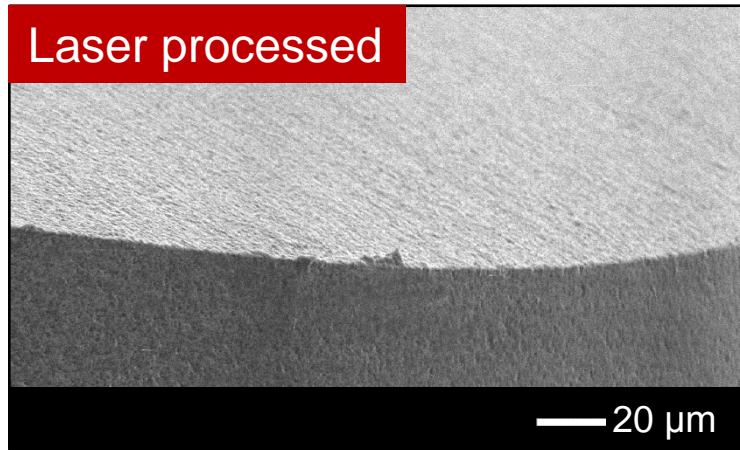
## Laser processed tool



## Diamond wheel ground tool

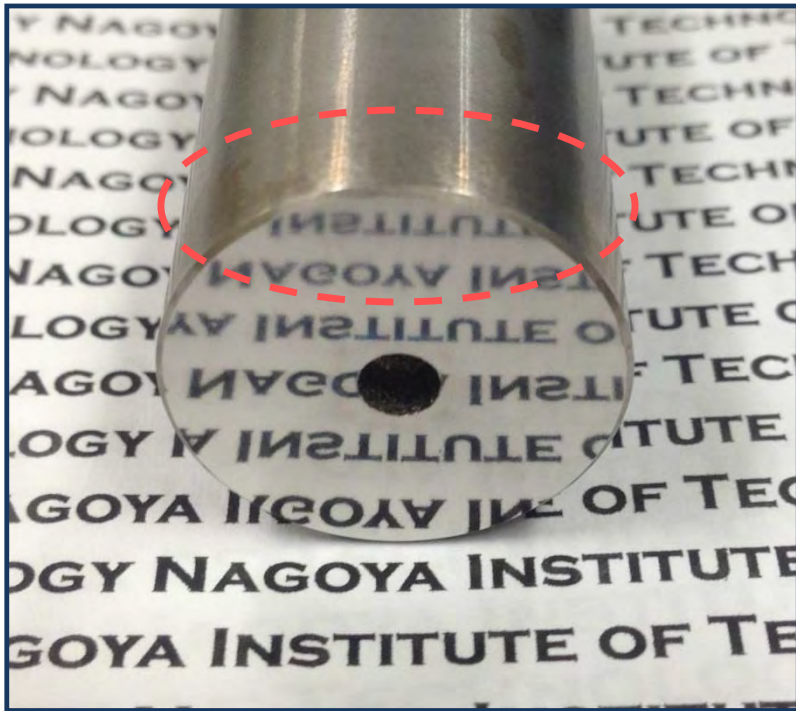


- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
PLG成形cBNの耐欠損性・耐エロージョン性向上

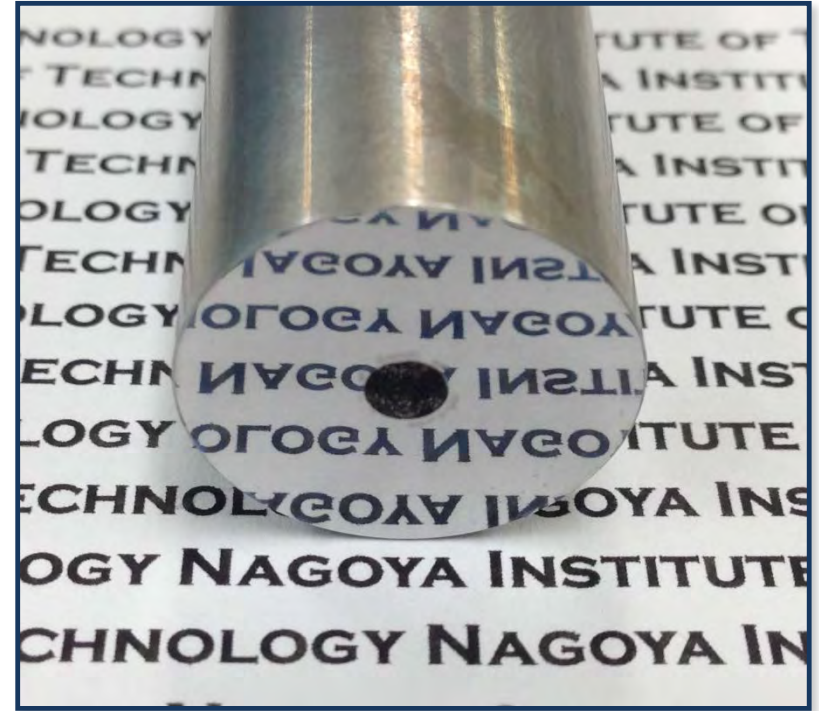


- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
PLG成形cBN工具による焼入れ鋼の精密仕上げ加工

- 焼入れ鋼の仕上げ面に反射する像の鮮明さにより仕上げ面品位を評価



研削仕上げ工具



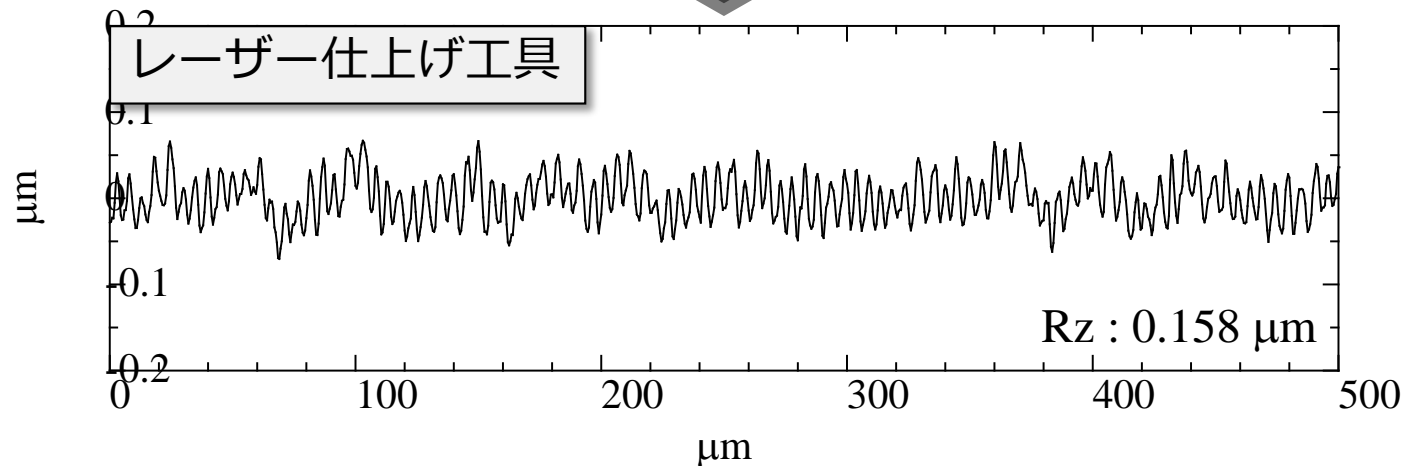
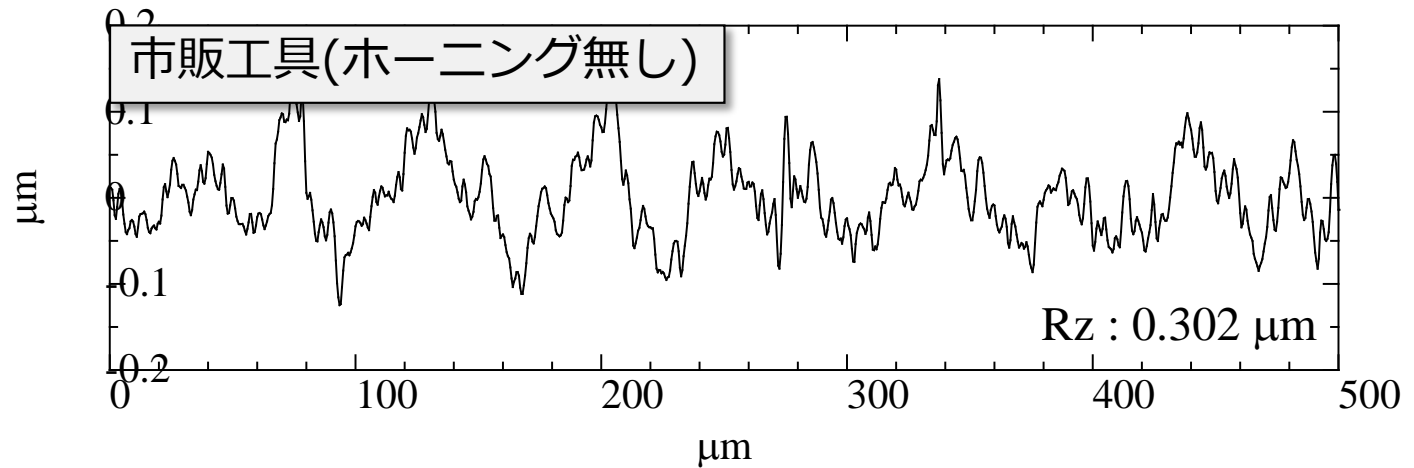
PLG仕上げ工具

研削仕上げ工具では、破線で示すあたりにくすみが見られるが、レーザー加工仕上げ工具ではそのようなくすみは見られず、平滑な仕上げ面となっている。



- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
PLG成形cBN工具による焼入れ鋼の精密仕上げ加工

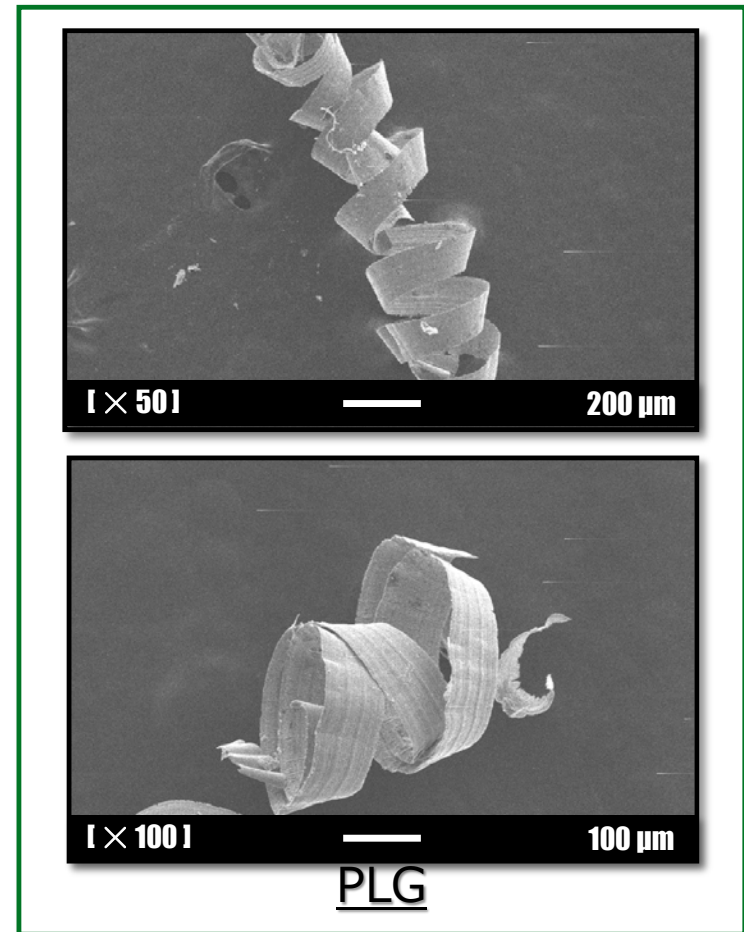
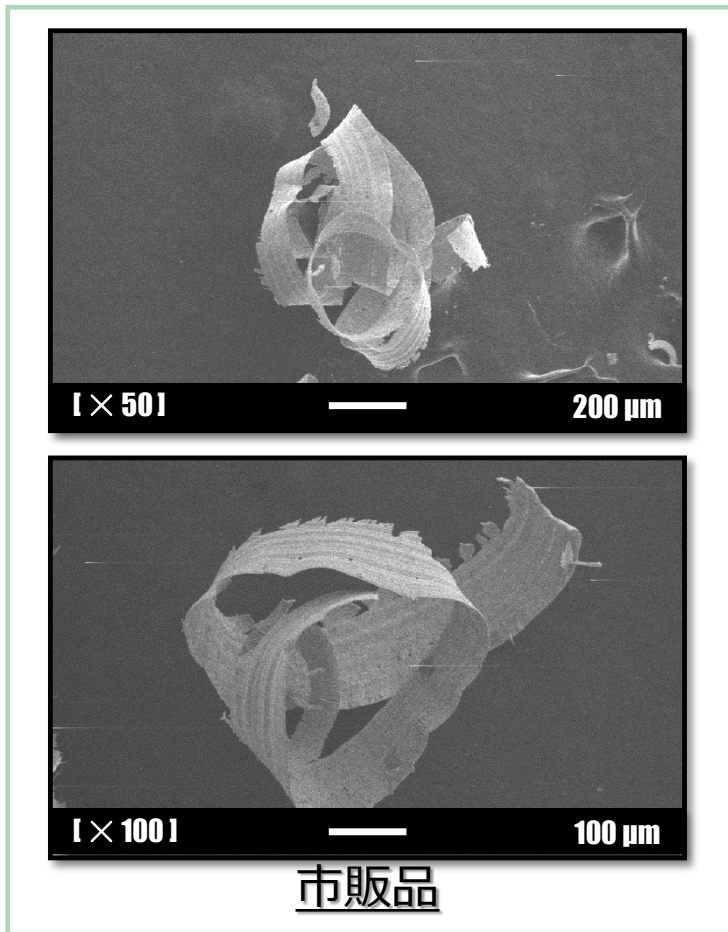
仕上げ面粗さ



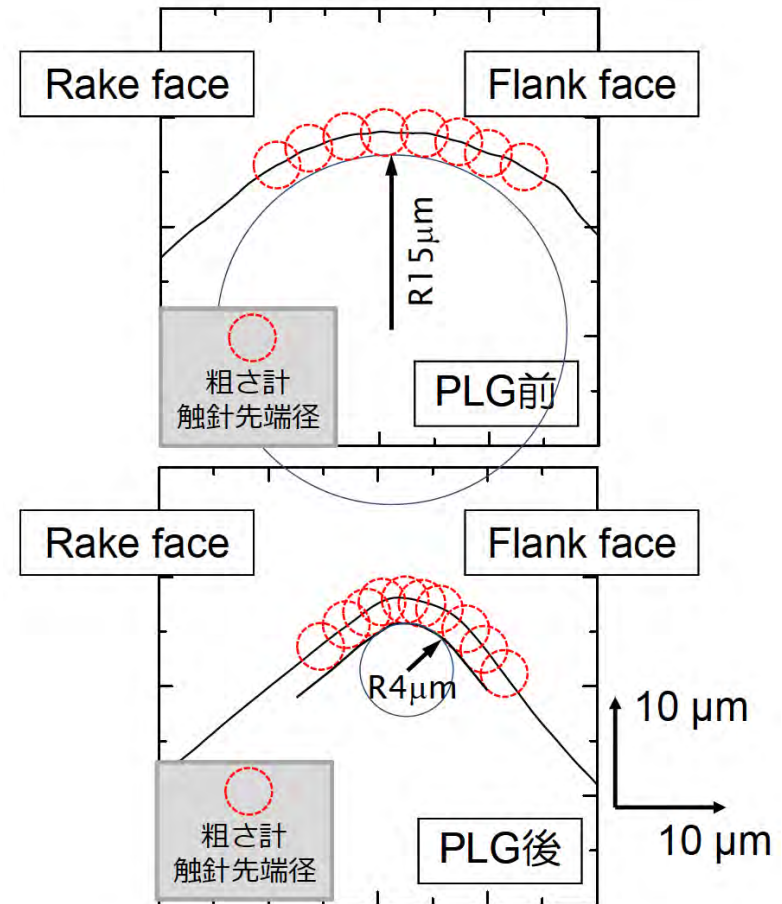
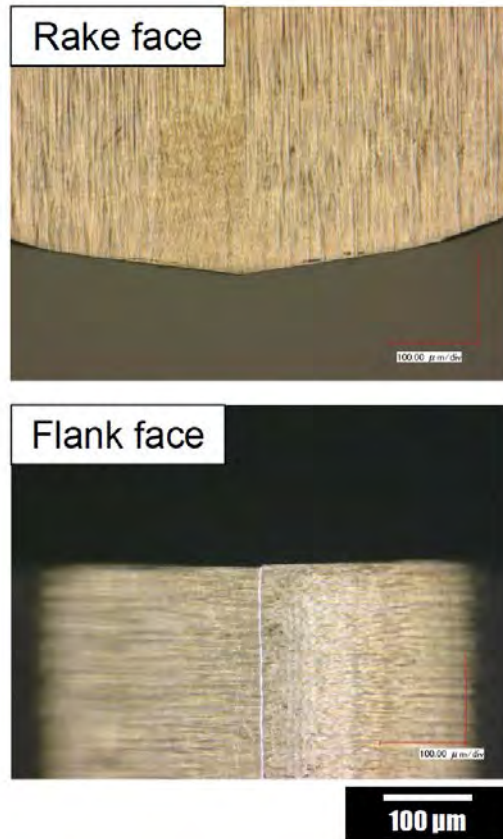
- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— Pulse Laser Grinding(PLG)

## PLG成形cBN工具による焼入れ鋼の精密仕上げ加工

切りくず

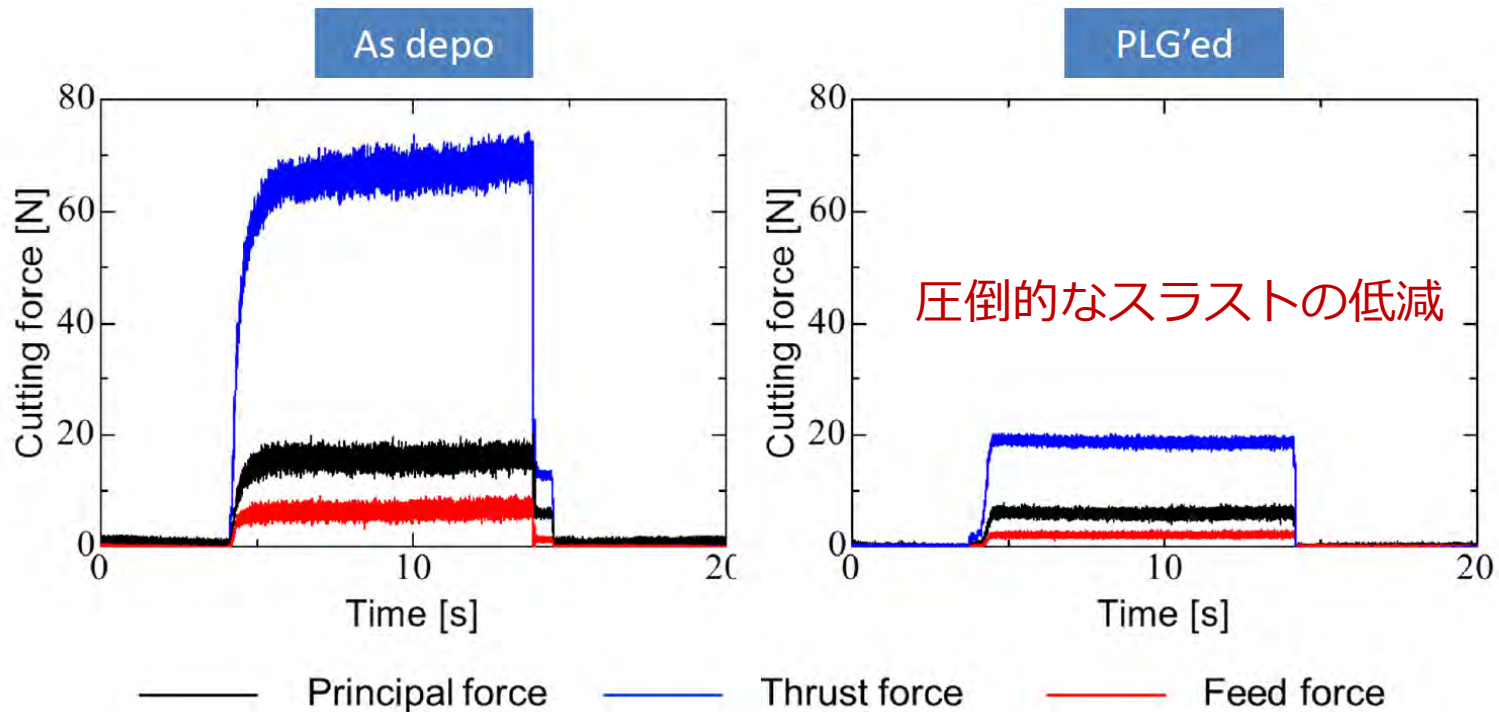


- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
CVDダイヤモンドコーティングへの適用

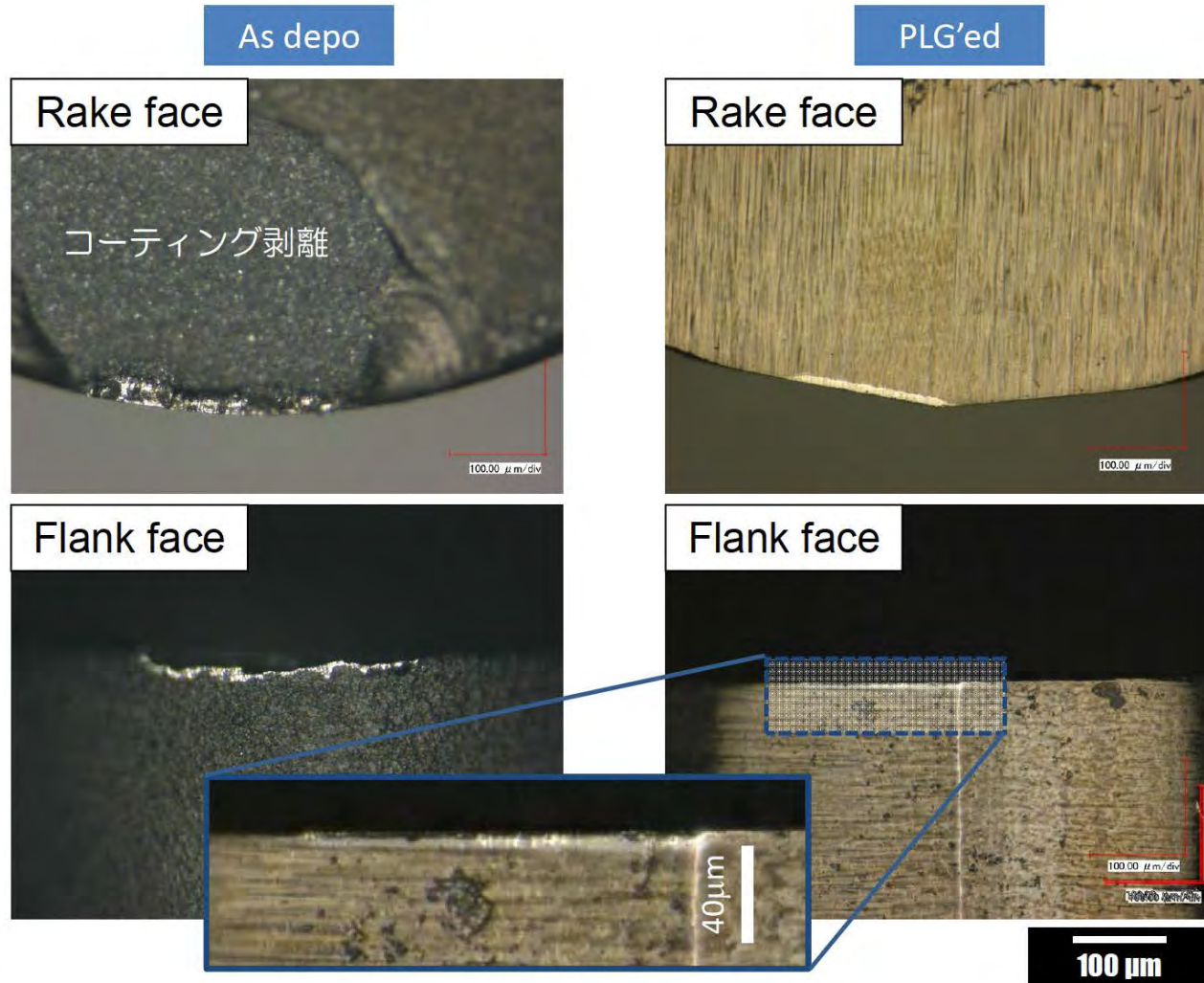


- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— Pulse Laser Grinding(PLG)  
CVDダイヤモンドコーティングによる超合金の切削

Work material	WC-Co (超微粒)
Cutting speed $V$	30m/min
Depth of cut $a_p$	0.025 mm
Feed rate $f$	0.02 mm/rev
Cutting distance $L$	5 m



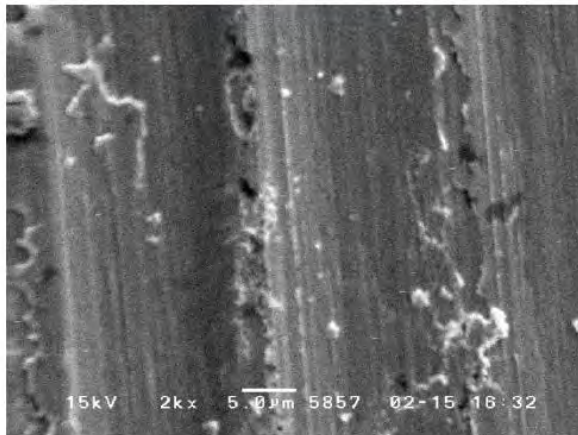
- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— **P**ulse **L**aser **G**rinding(PLG)  
CVDダイヤモンドコーティングの工具摩耗



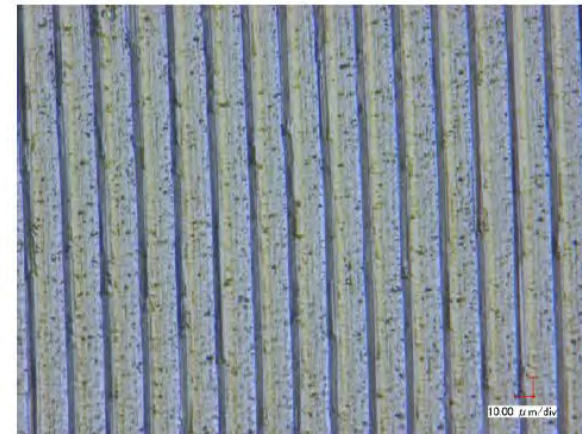
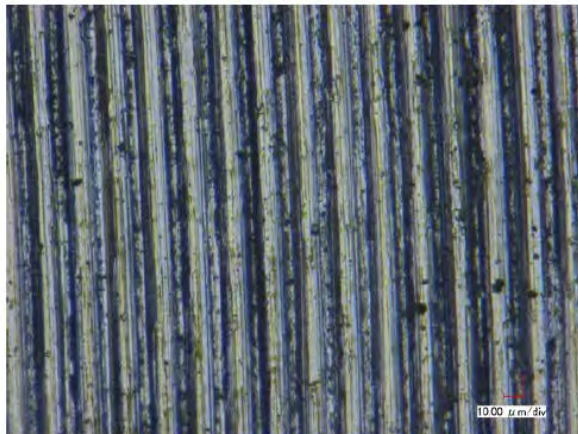
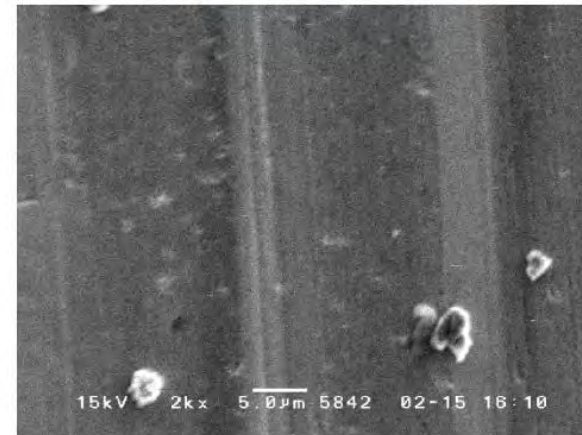
剥離やチップングの無い定常摩耗の実現

- 高硬度材：高精度・高能率加工を実現する刃先成形— Pulse Laser Grinding(PLG)  
他の工具材種への応用：CVDダイヤモンドコーティング

As depo



PLG'ed



切れ味の向上による工具刃先形状の転写性の向上

## まとめ

工具材料開発に加えて、工具刃先設計法・工具刃先成形法を推し進めることで、更なる高能率・長寿命な切削加工が可能となる。