

航空宇宙向け難削材の最新切削・研削技術

第5回 CMIシンポジウム
航空機製造技術の新たな展開を目指して
－CMI活動の成果と今後への期待－
2017年10月17日

東京農工大学
笹原弘之

1. 砥石内研削液供給による高能率形状研削
2. 砥石内研削液供給によるCFRPの研削加工
3. 砥石表面温度のモニタリングによる
研削状態の判別
4. 曲線丸のこによるCFRPの高能率切断

Ni基超耐熱合金

ジェットエンジン ガスタービンエンジン

Inconel (Ni基超耐熱合金)

- 熱伝導率 低
- 加工硬化 大
- 材料強度 高



切削加工での高効率化が課題



<http://academic.csuohio.edu/cact/acrl%20project.htm>

曲面形状工作物

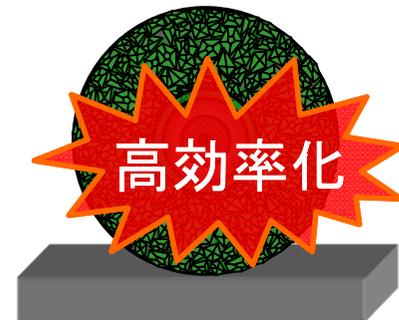


<http://www.nagaiseiki.co.jp/04products.html>

切削加工 + 手作業による仕上げ▷ 工程の高効率化が課題

研削による輪郭加工での仕上げ

仕上げ面精度**高**, 形状精度**高**



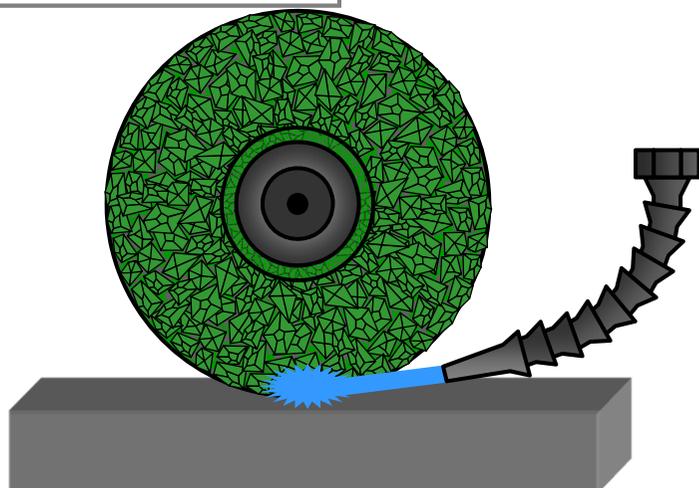
目的

同時5軸研削加工により, 難削材に対し3次元形状加工を行う

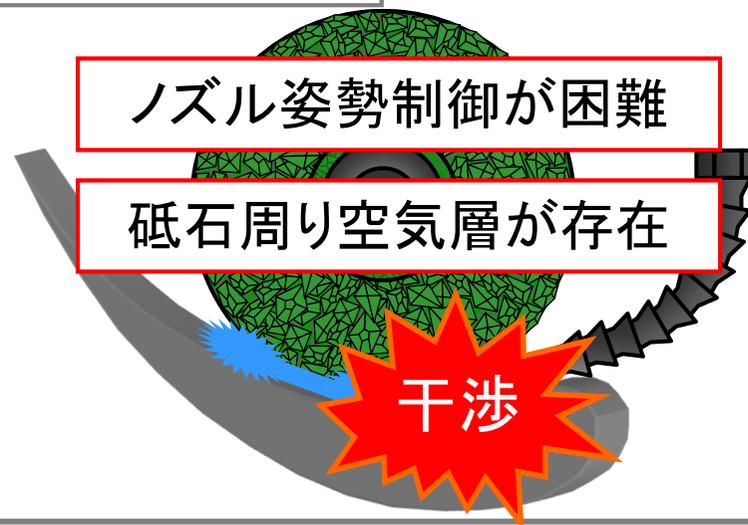
平和産業(株)との共同研究

研削液供給方法

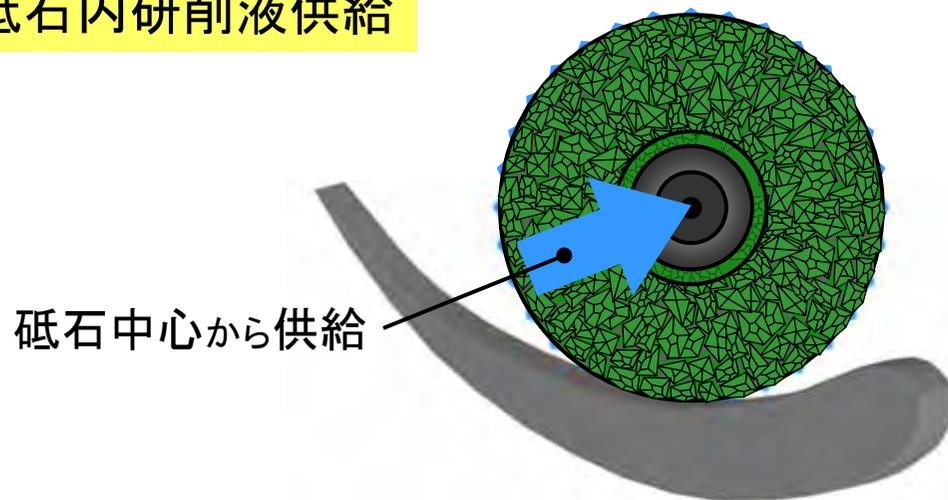
一般的な工作物



曲面形状工作物



砥石内研削液供給

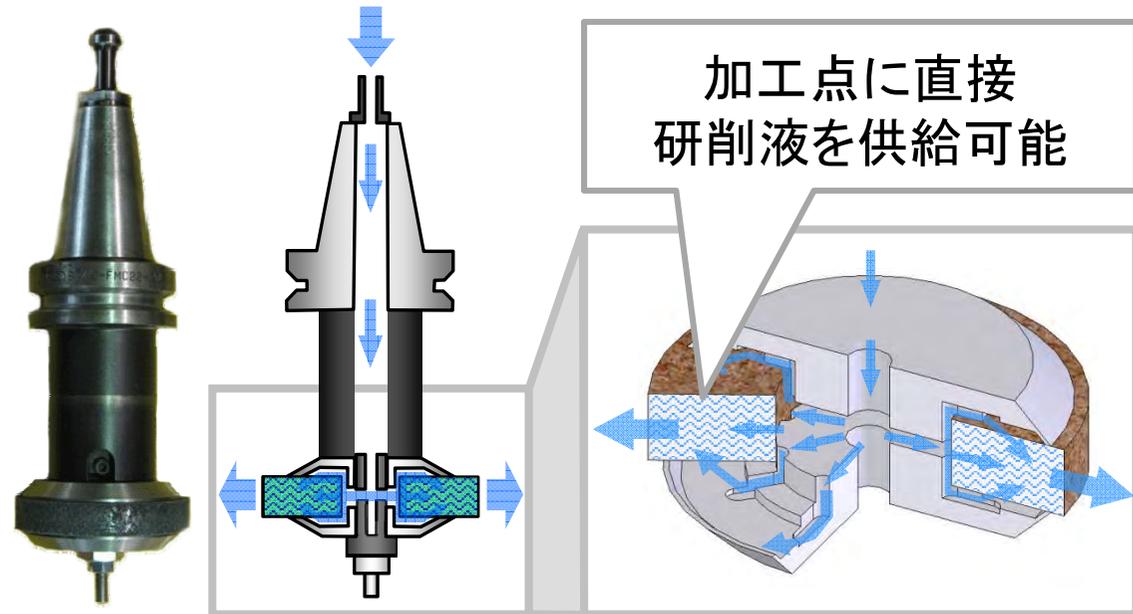
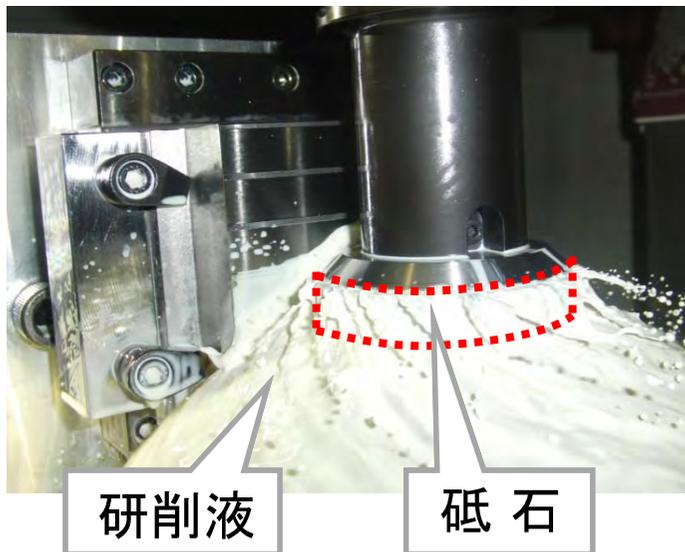


ノズル制御不要

加工点へ研削液供給

加工温度上昇の抑制

スピンドルスルー



マシニングセンタで使用可能



切削同等の加工能率
良好な表面粗さと形状精度

特許第5380674号

Y. Yao, Y. Fuwa and H. Sasahara, Development of a Device for Coolant Supply from Inside of Grinding Wheel and its Application for Profile Machining of Difficult to Grinding Materials, Proc. 4th CIRP Int. Conf. on High Performance Cutting, (2010.10.24-26) Vol.1, pp.417-420

実験条件



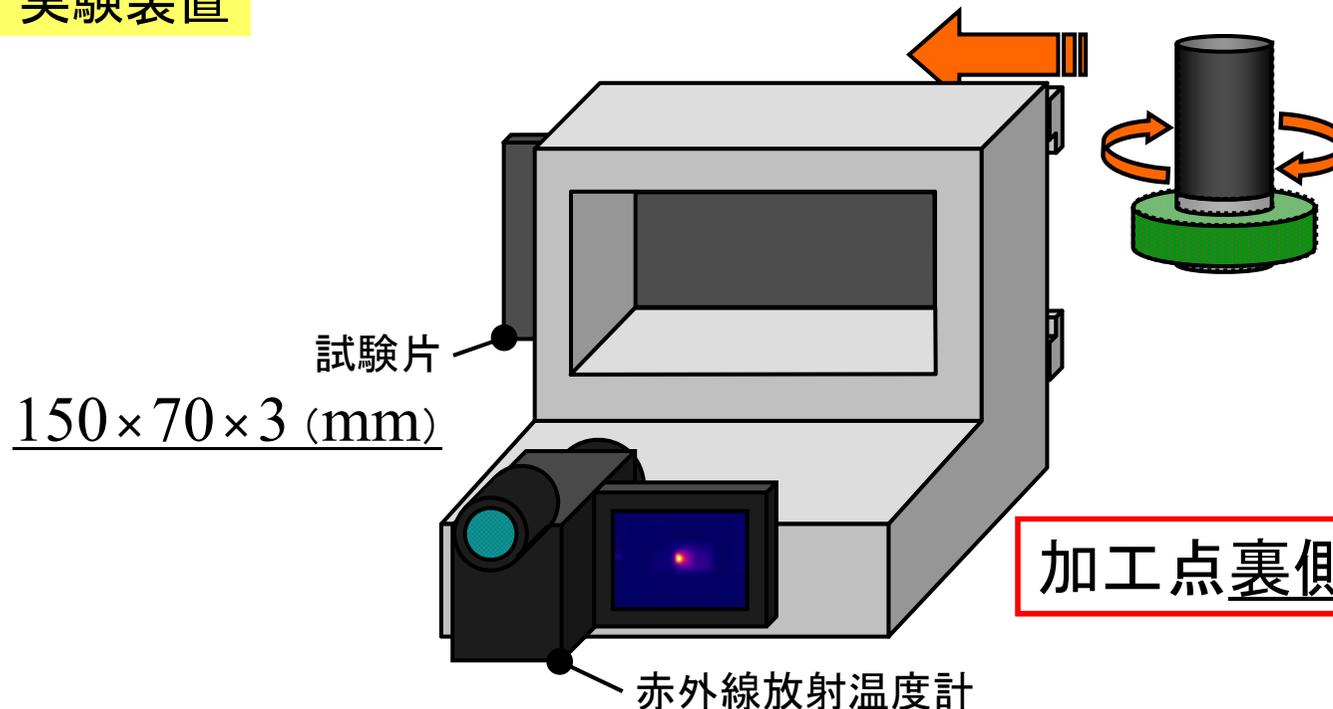
研削焼けが問題

厚さ3mm薄板を研削

Grinding velocity	m/s	20	
Feed rate	mm/min	500	
Depth of cut	mm	0.2	
Type of cutting		up	
Grinding fluid		emulsion type	
Amount of grinding fluid supply	L/min	15	15
Workpiece		SS400	Inconel 718

加工温度・研削焼けを測定し通常研削と比較

実験装置



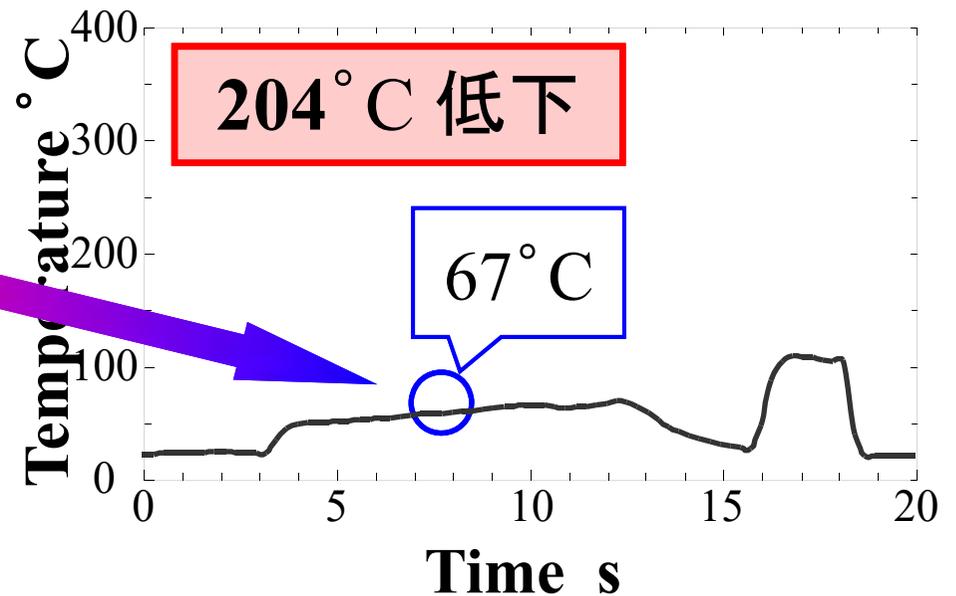
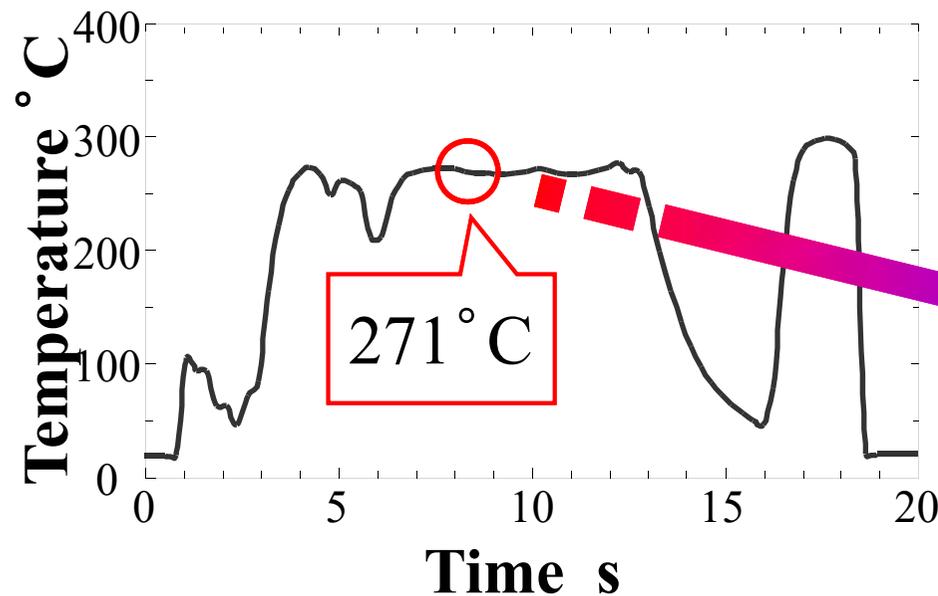
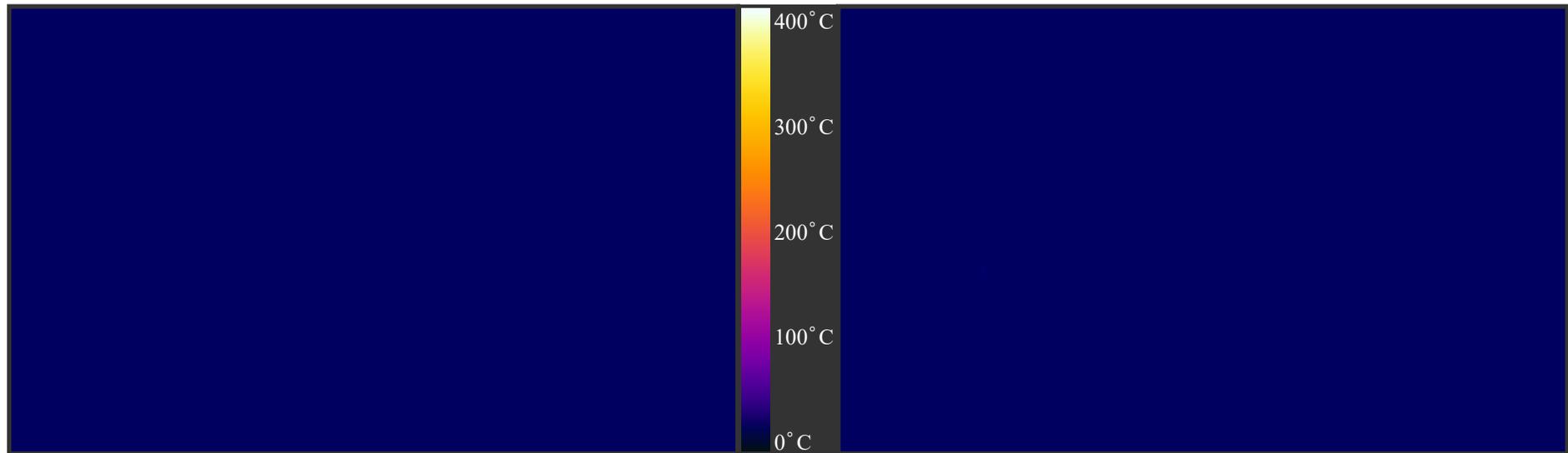
加工点裏側の表面温度を測定

研削点裏面の温度 Inconel 718

$V_c = 20\text{m/s}$, $V_f = 500\text{mm/min}$, $t = 0.2\text{mm}$, 15L/min

通常研削

砥石内研削液供給

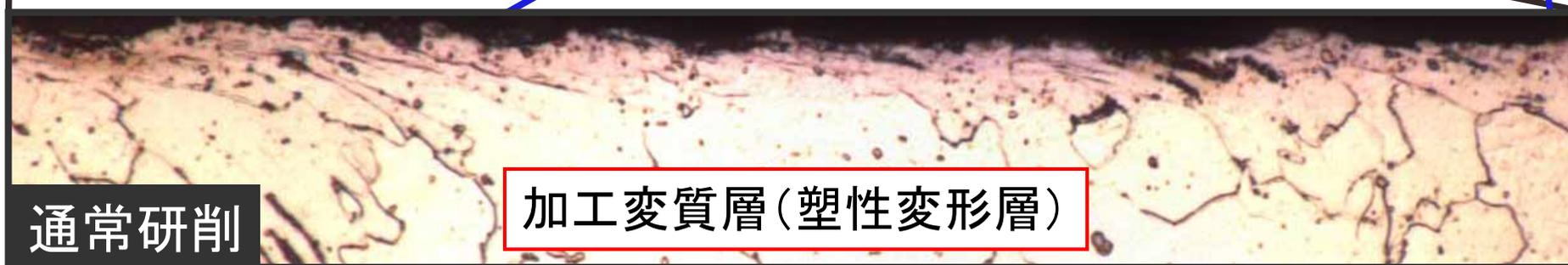
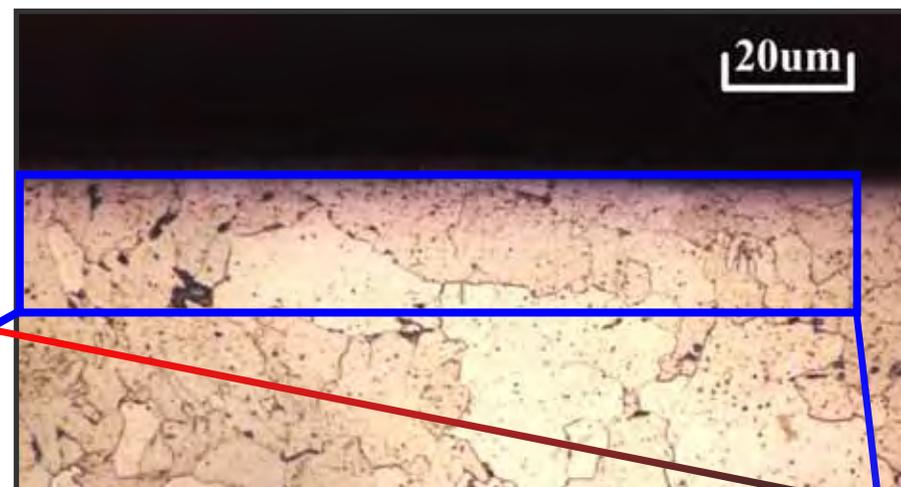
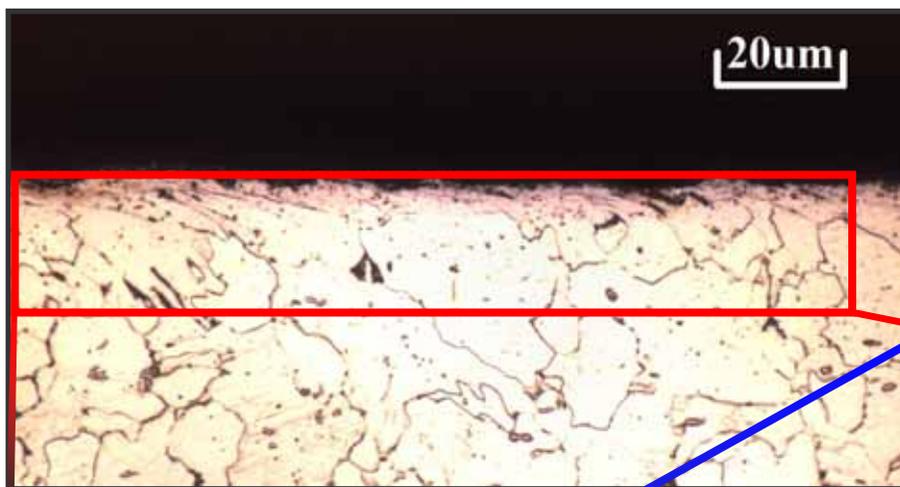


加工変質層 SS400

$V_c = 20\text{m/s}$, $V_f = 500\text{mm/min}$, $t = 0.2\text{mm}$, 15L/min

通常研削

砥石内研削液供給

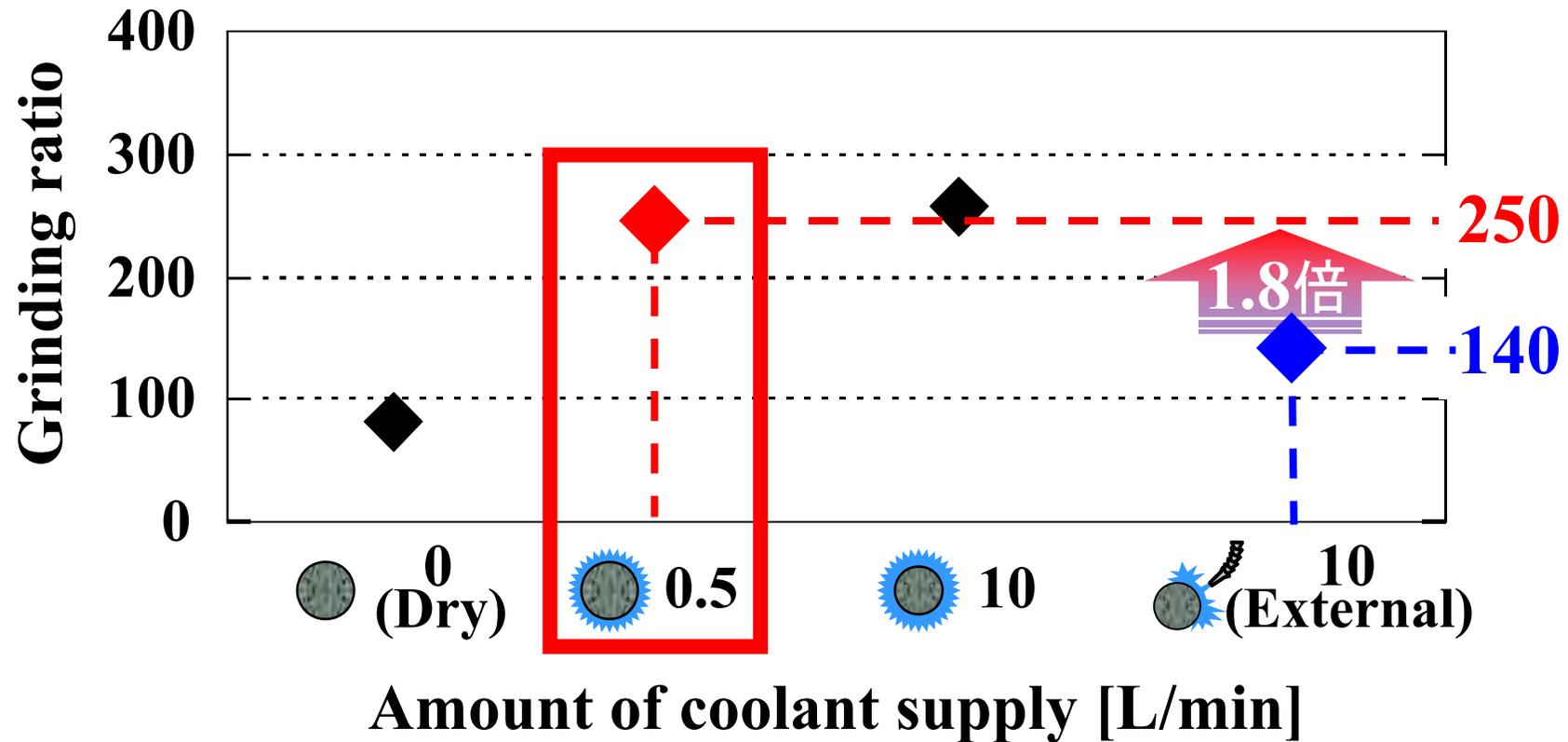


砥石摩耗(研削比)

高いほど良い

摩耗(100パス加工)

研削比: 砥石の摩耗量に対する被削材料の除去量



少量(0.5 L/min)でも通常の1.8倍の研削比



砥石内研削液供給によるCFRPの研削加工

～平和産業(株)との共同研究～

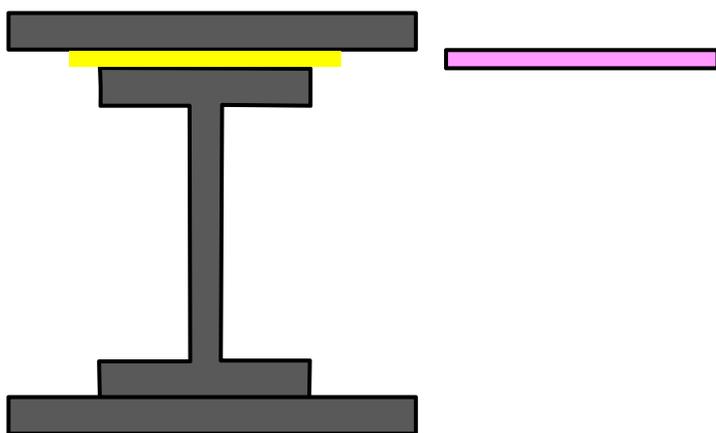
H. Sasahara, T. Kikuma, R. Koyasu, Y. Yao, Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel, Precision Engineering, 38, 4 (2014) pp. 775-782. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.04.005

CFRP(炭素繊維強化プラスチック)

高比強度

高比弾性

▶ 航空機部品に多用



成形時の寸法精度が低い

組立て時に部材間の隙間調整

シムと呼ばれる薄肉部品が必要

CFRPの平面加工(厚み調整)

切削加工時の問題

・バリ, 毛羽立ち, 剥離 ▶ 加工精度低下

・激しい工具摩耗

・熱によるマトリクス樹脂の軟化・流動 ▶ 材料信頼性の低下

樹脂のガラス転移点以下での高精度・高効率な加工

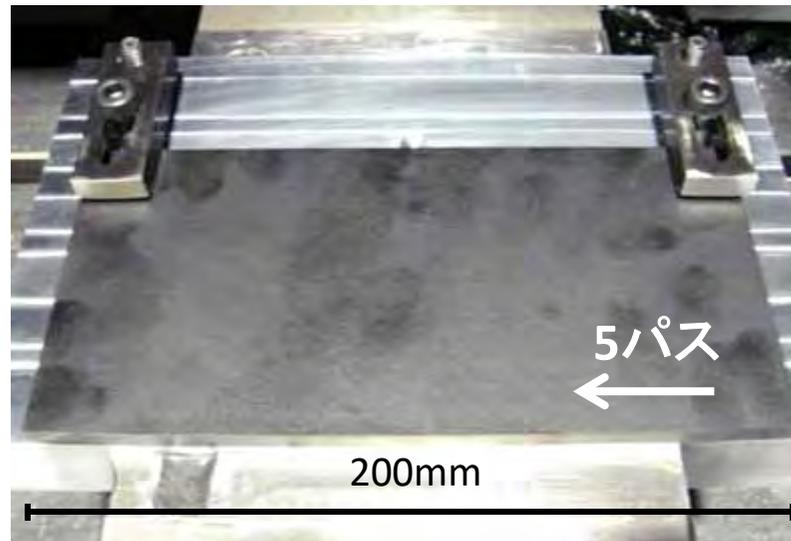
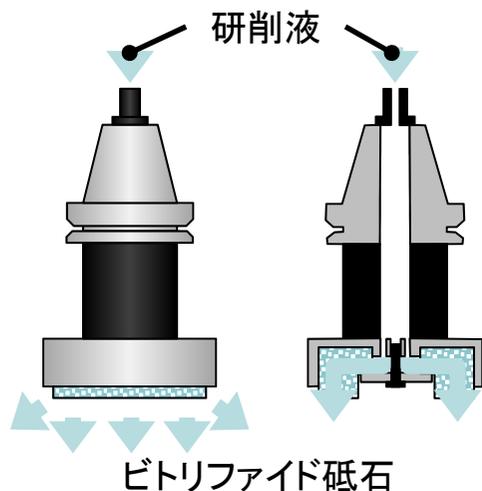
切削加工と砥石内研削液供給研削加工の比較

切削加工



刃先交換式超硬工具
(刃数: 4枚)

砥石内研削液供給



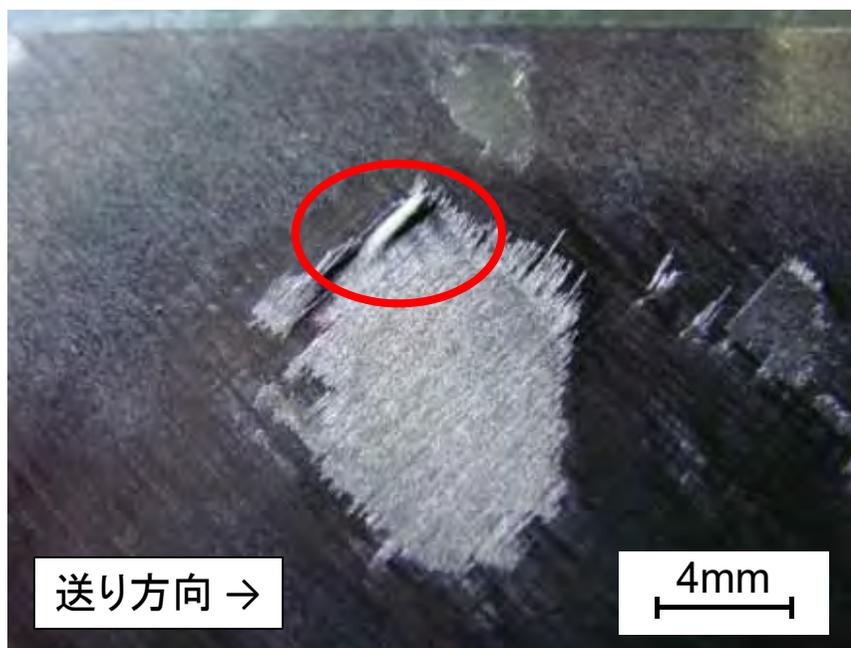
厚さ方向の加工

実験条件

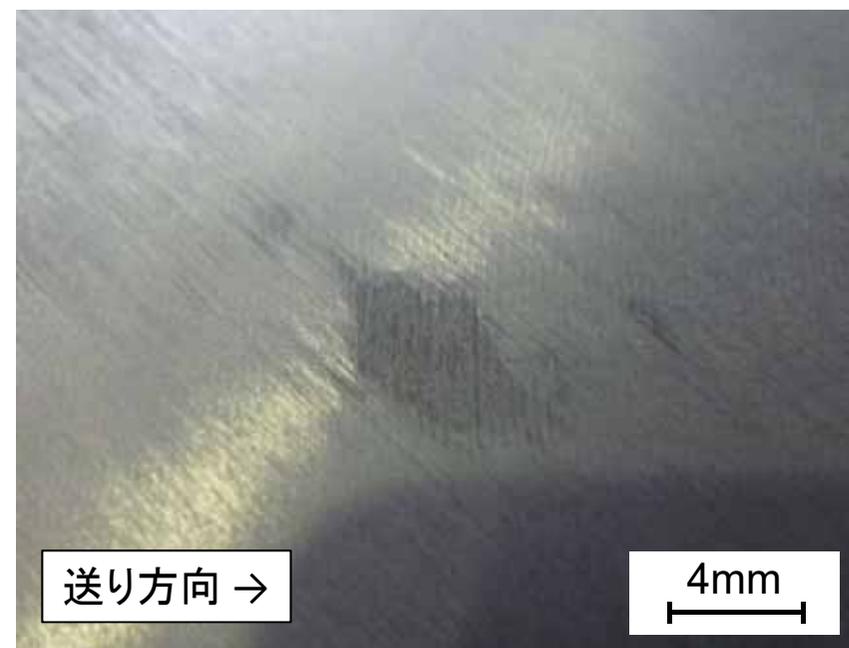
		切削加工	砥石内研削液供給研削
工具周速度	m/min	300	
送り速度	mm/min	500	
工具径	mm	50	75
研削液流量	l/min	20	
切り込み	mm	1	
加工幅	mm	40	60
被削材		CFRP 多方向積層材 (100 × 200 × 7.6mm)	

研削加工では
大きい

切削加工

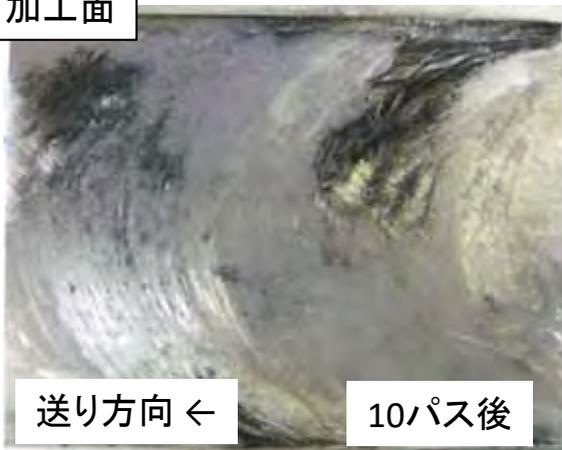


砥石内研削液供給研削



ドライ加工

加工面



激しい剥離, 毛羽立ち

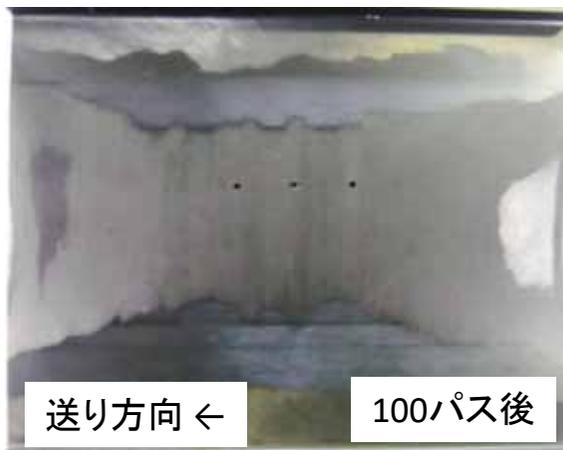
砥石



砥石全面目づまり

→ 加工中止

外部ノズル供給

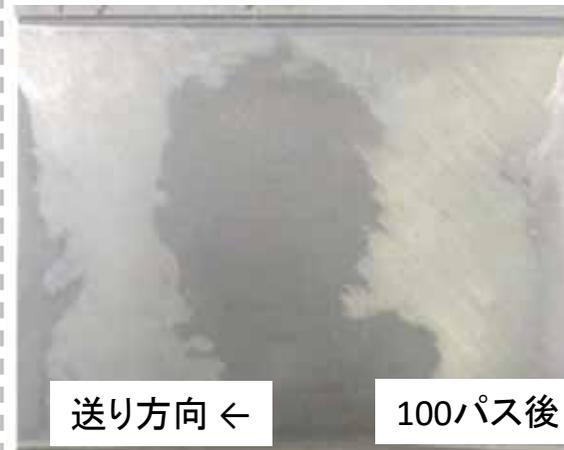


バリ, 剥離, 毛羽立ちなし



目づまり あり

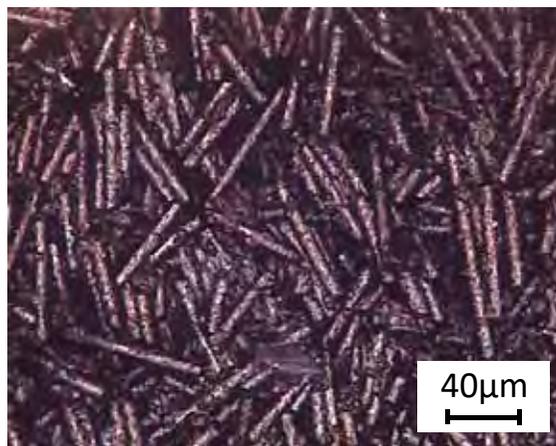
砥石内研削液供給



目づまり なし

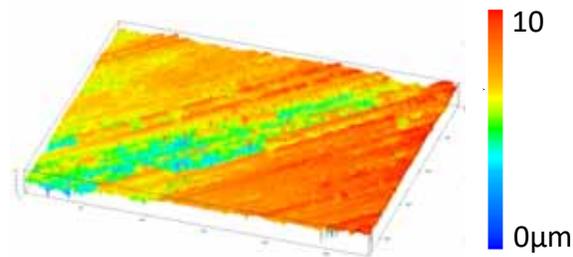
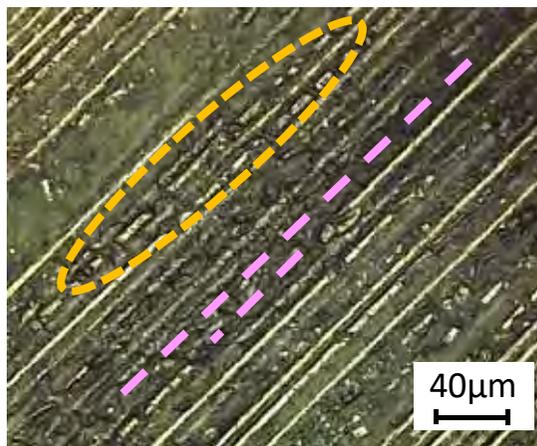
研削方向 ↑↓ 送り方向 ← 繊維方向 ↗

ドライ加工



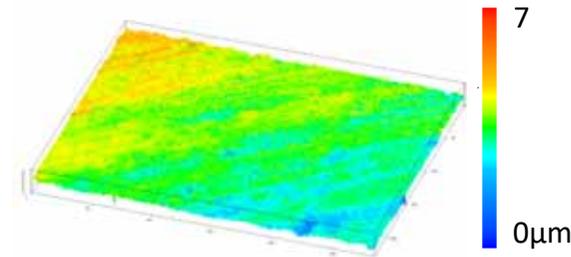
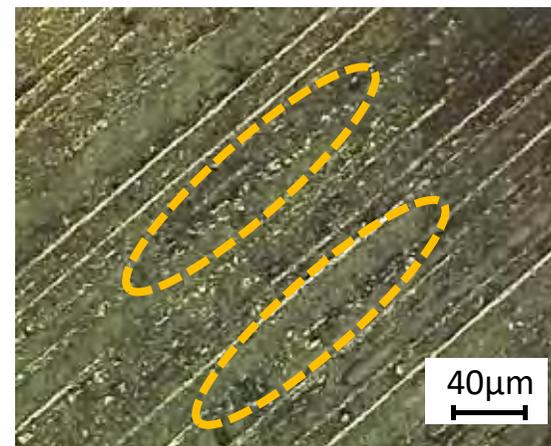
繊維が毛羽立ち、
乱れている

外部ノズル供給



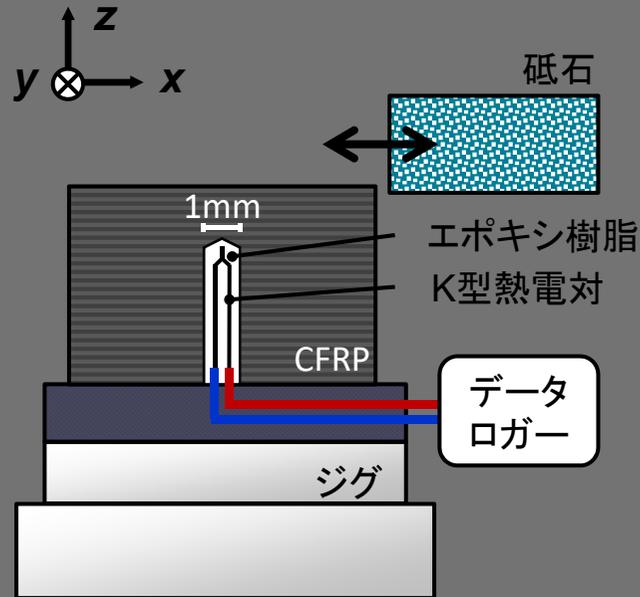
砥粒により
繊維が削り取られた
+
繊維が樹脂との界面で
剥離

砥石内研削液供給



砥粒により
繊維が削り取られた

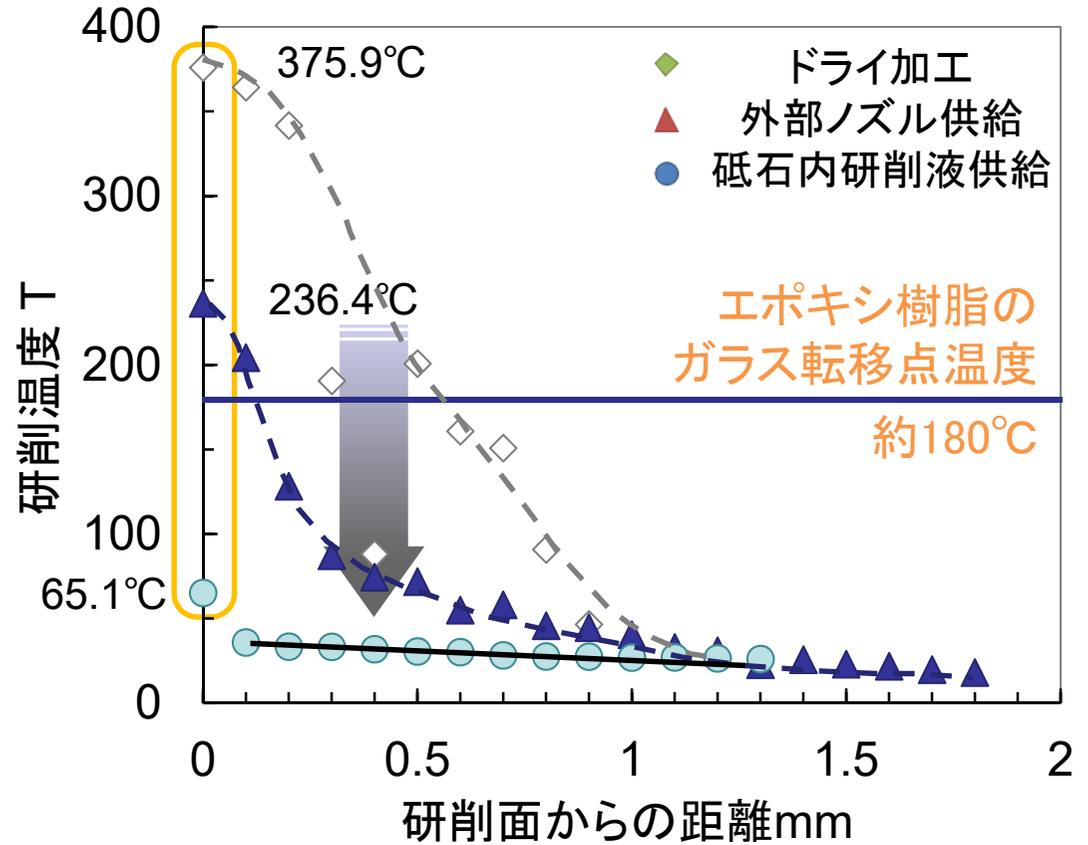
研削温度測定方法



熱電対埋め込み法

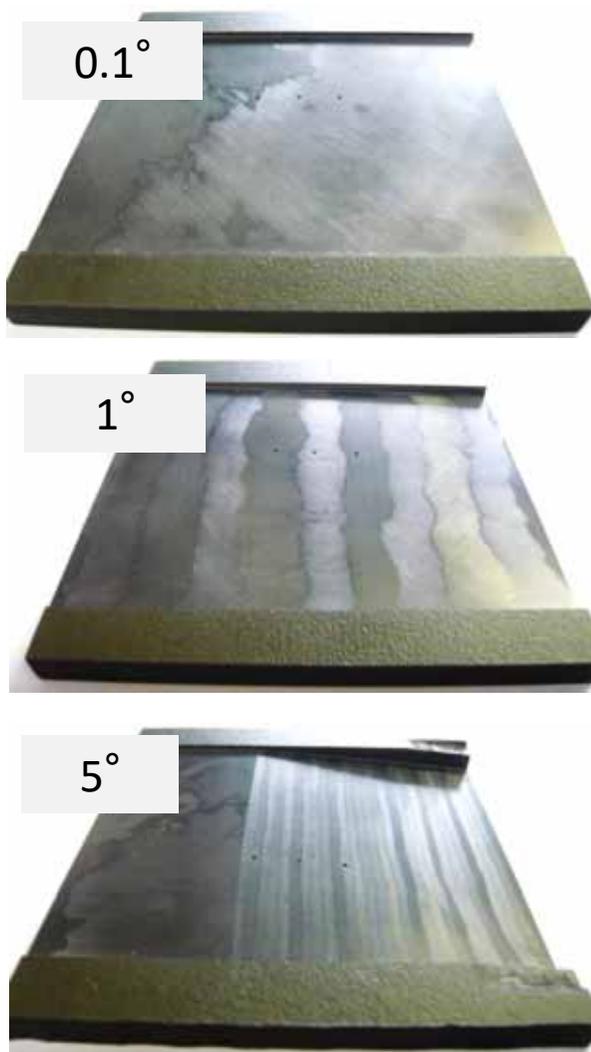
研削温度

気温:	ドライ加工	16.7°C
	外部ノズル供給	16.4°C
	砥石内研削液供給	24.4°C

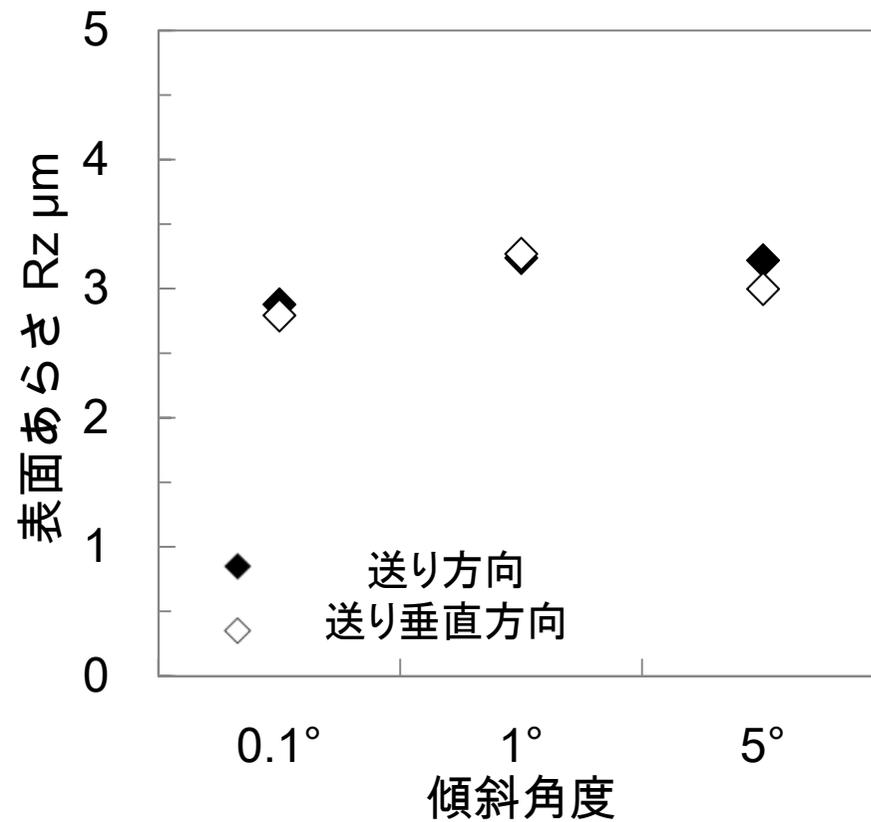


● 砥石内研削液供給では研削点温度が低い

● 砥石内研削液供給では非研削点での温度上昇抑制



表面あらし



バリ, 剥離, 毛羽立ちなし

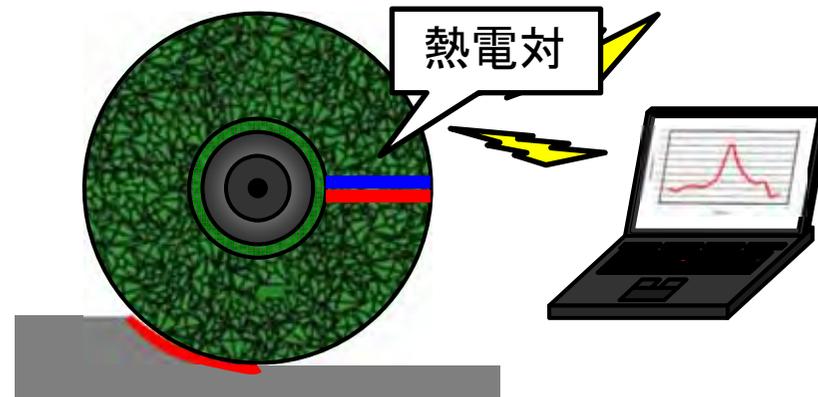
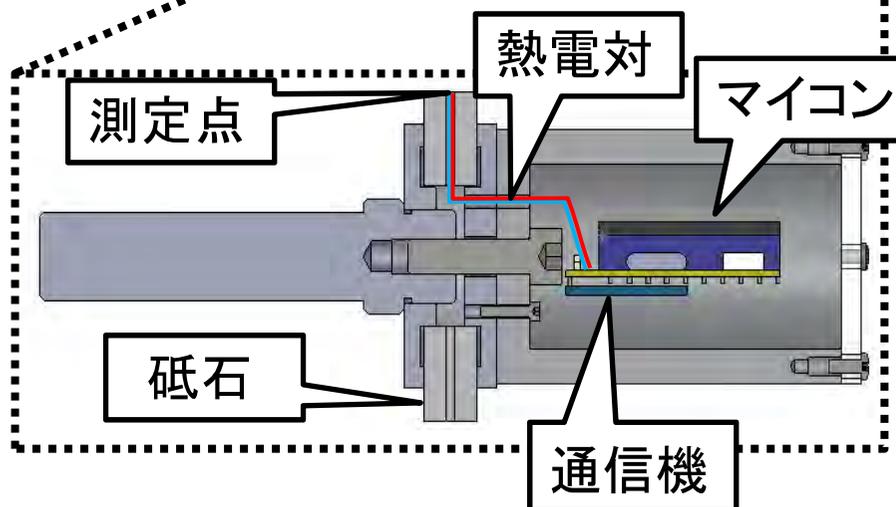
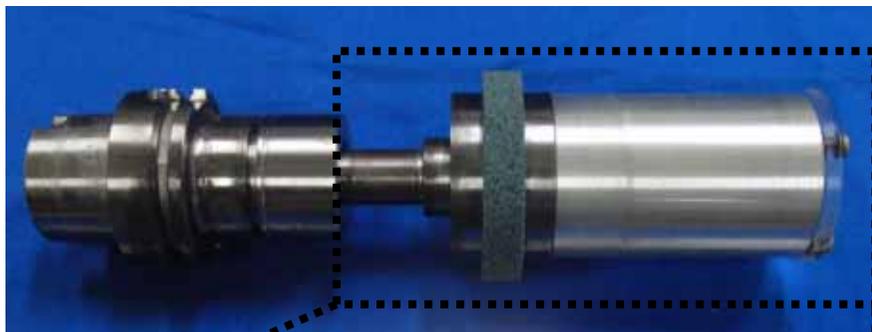
砥石表面温度のモニタリングによる 研削状態の判別

Y. Fukuhara, S. Suzuki, H.Sasahara, Real-time Grinding State Discrimination Strategy by Use of Monitor-embedded Grinding Wheels, Precision Engineering, DOI : 10.1016/j.precisioneng.2017.07.019

提案

加工状態モニタリング砥石

温度測定方法



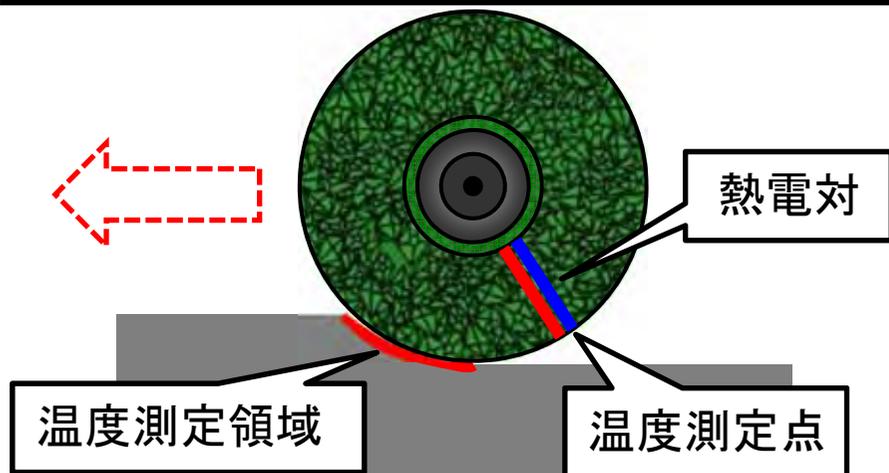
温度データはPCに常に転送

加工中の砥石表面温度の
モニタリングが可能

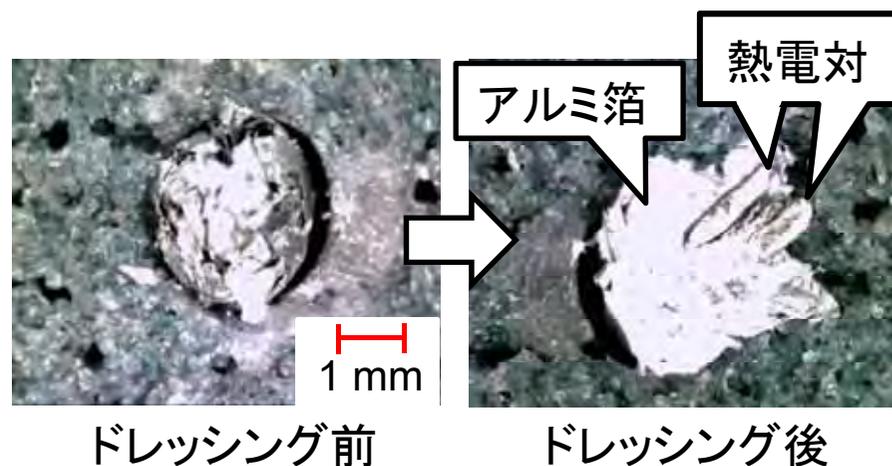
目的

砥石表面温度から
加工中の研削状態を判別

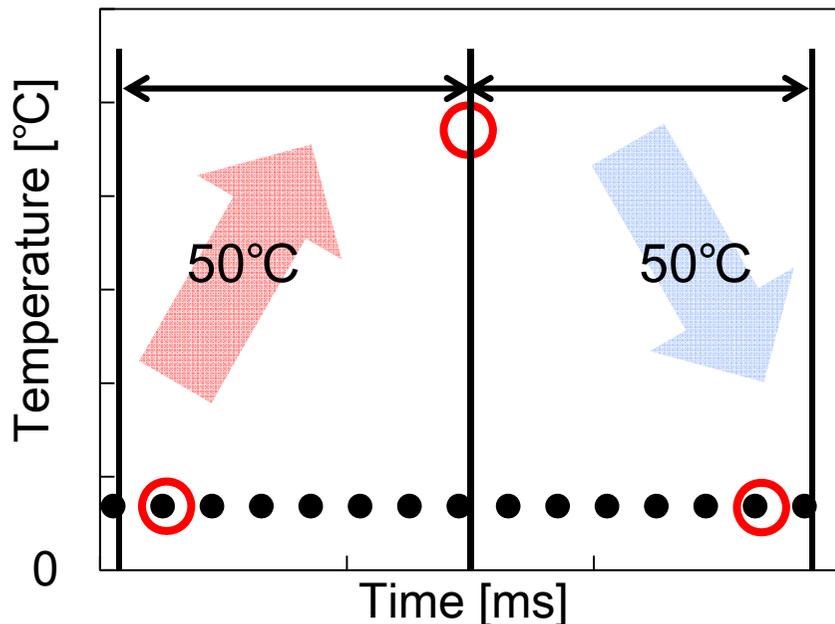
測定領域



温度測定点



測定された温度データの出力条件



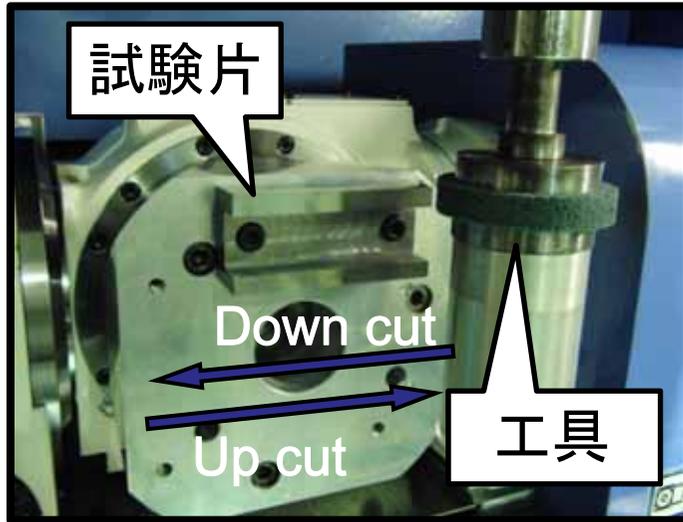
サンプリングタイム: 43 μ s

加工開始: 50 以上の温度上昇

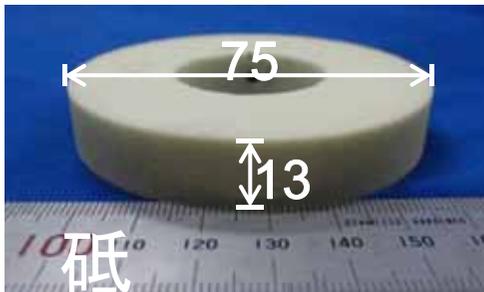
加工終了: 50 以上の温度降下

加工中の砥石表面温度を
砥石1回転ごと収集

実験条件



Grinding velocity	m/s	7.85			
Feed rate	mm/min	500			
Depth of cut	mm	0.02 (10 pass)			
Grinding method		up cut , down cut			
Type of coolant supply		dry			
Material of workpiece		S50C			
Grain		WA	A	A	WA
Grain size		#80	#46	#120	#46
Grade		K	R	R	H
Structure		14	7	7	10



	基準	目つぶれ	目づまり	目こぼれ
砥粒	WA	A	A	WA
粒度	#80	#46	#120	#46
結合度	K	R	R	H
組織	14	7	7	10

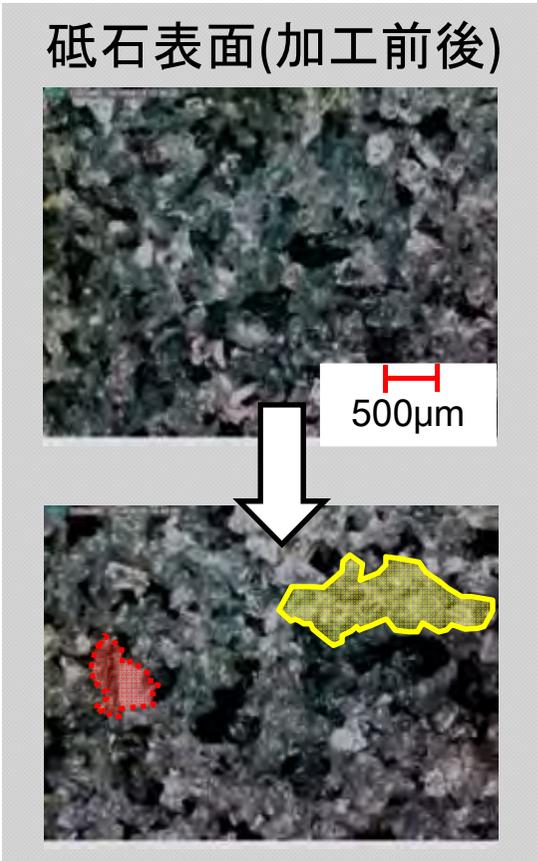
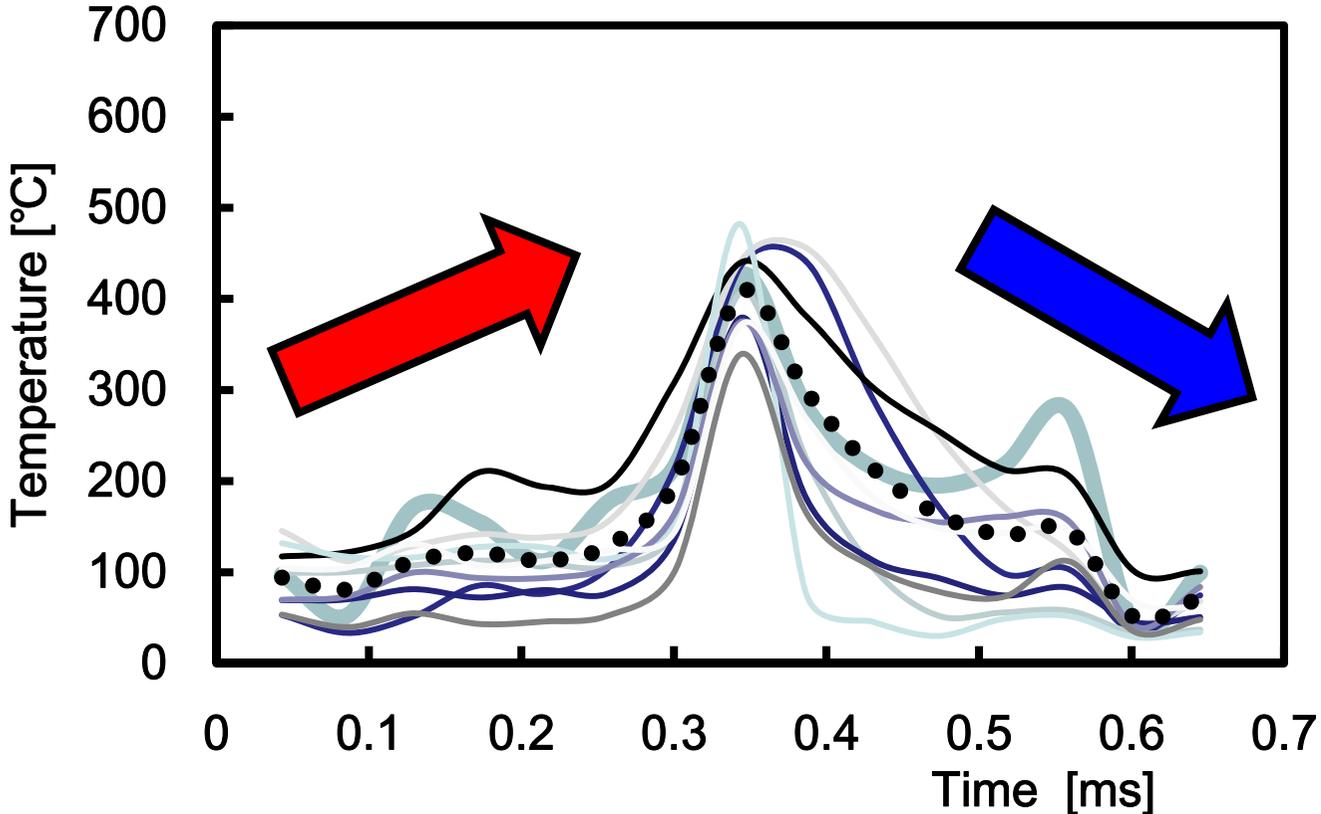
正常な加工と異常発生時の温度データを取得

温度測定結果 -基準砥石 (正常)-

基準砥石 WA80 K14

加工領域における砥石表面の温度変化

- 1pass
- 2pass
- 3pass
- 4pass
- 5pass
- 6pass
- 7pass
- 8pass
- 9pass
- 10pass
- average

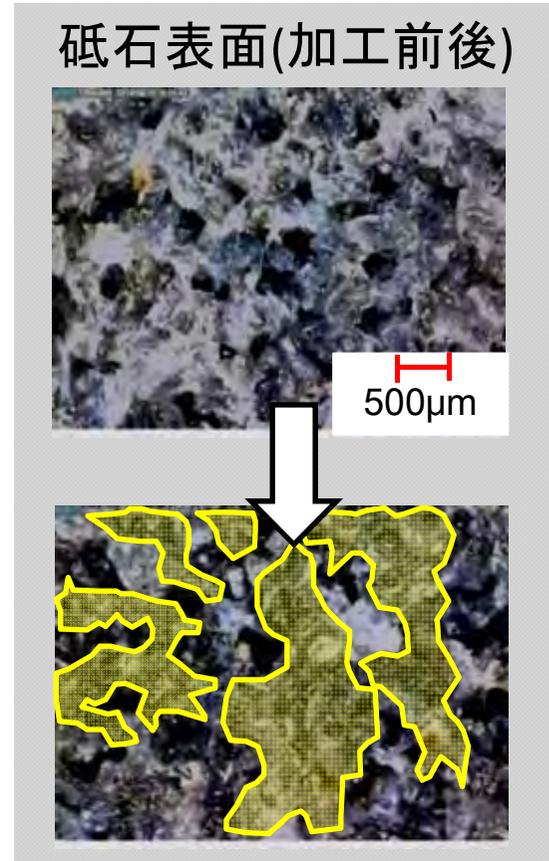
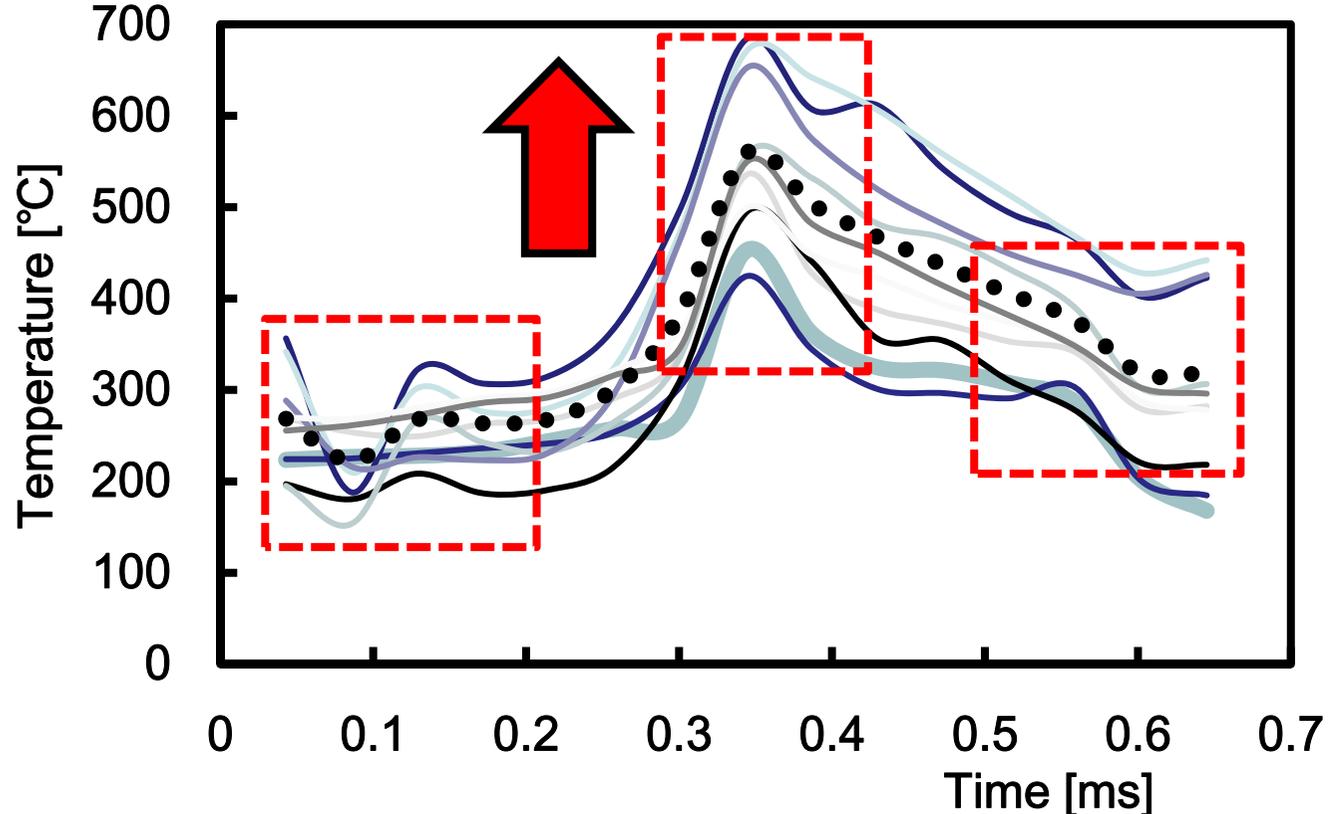


Number of machining	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature °C	426	440	456	440	407	379	482	375	372	339

適度な自生作用が発生し、正常に研削

A 46 R 7 加工領域における砥石表面の温度変化

— 1pass — 2pass — 3pass — 4pass — 5pass — 6pass
— 7pass — 8pass — 9pass — 10pass ●●● average



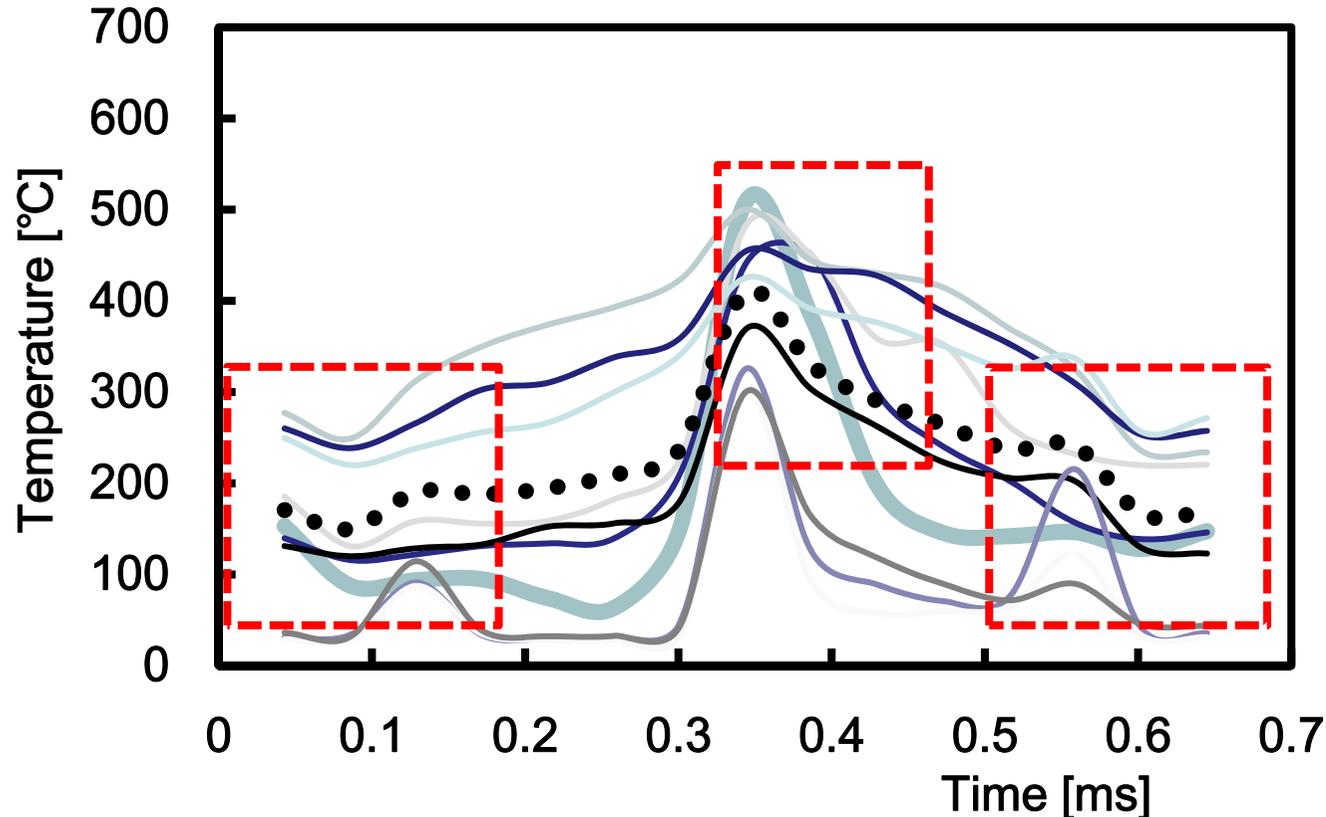
Number of machining	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature °C	453	424	535	495	557	684	671	652	498	549

最高温度が上昇傾向 (砥粒の摩滅による研削熱の発生)

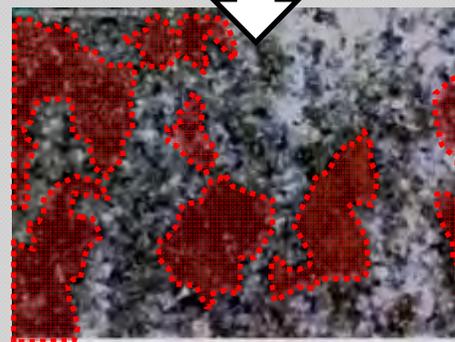
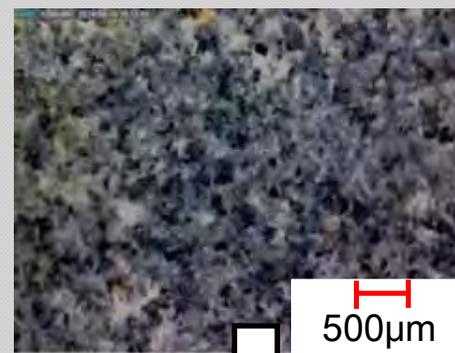
A 120 R 7

加工領域における砥石表面の温度変化

— 1pass — 2pass — 3pass — 4pass — 5pass — 6pass
— 7pass — 8pass — 9pass — 10pass ●●● average



砥石表面(加工前後)



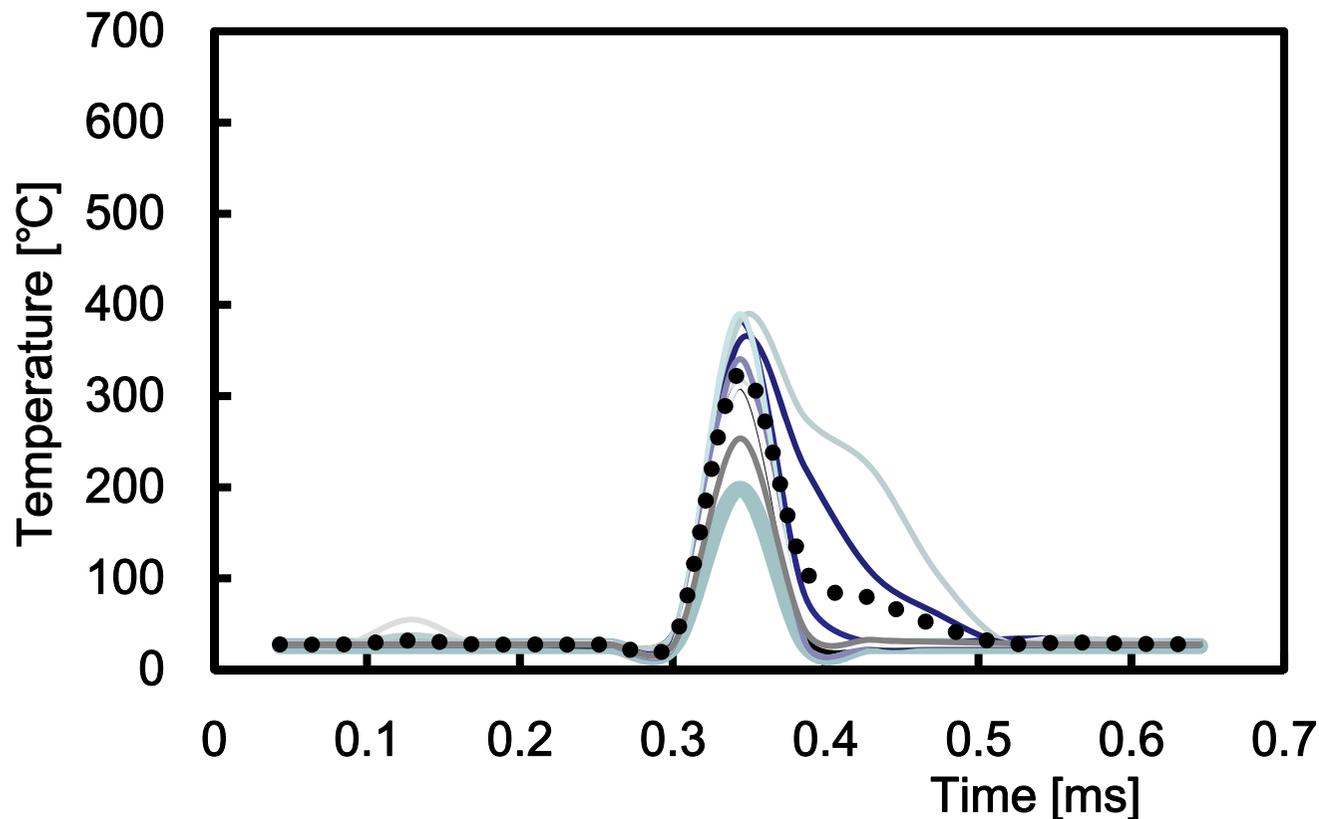
Number of machining	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature °C	509	450	483	369	500	454	425	326	301	300

最高温度からの温度下降が緩やか(被削材溶着による熱容量の増大)

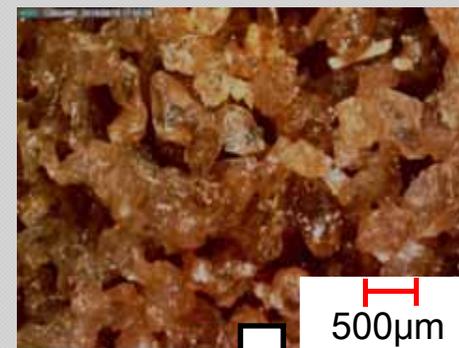
WA 46 H 10

加工領域における砥石表面の温度変化

1pass 2pass 3pass 4pass 5pass 6pass
7pass 8pass 9pass 10pass ●●●average



砥石表面(加工前後)



500µm

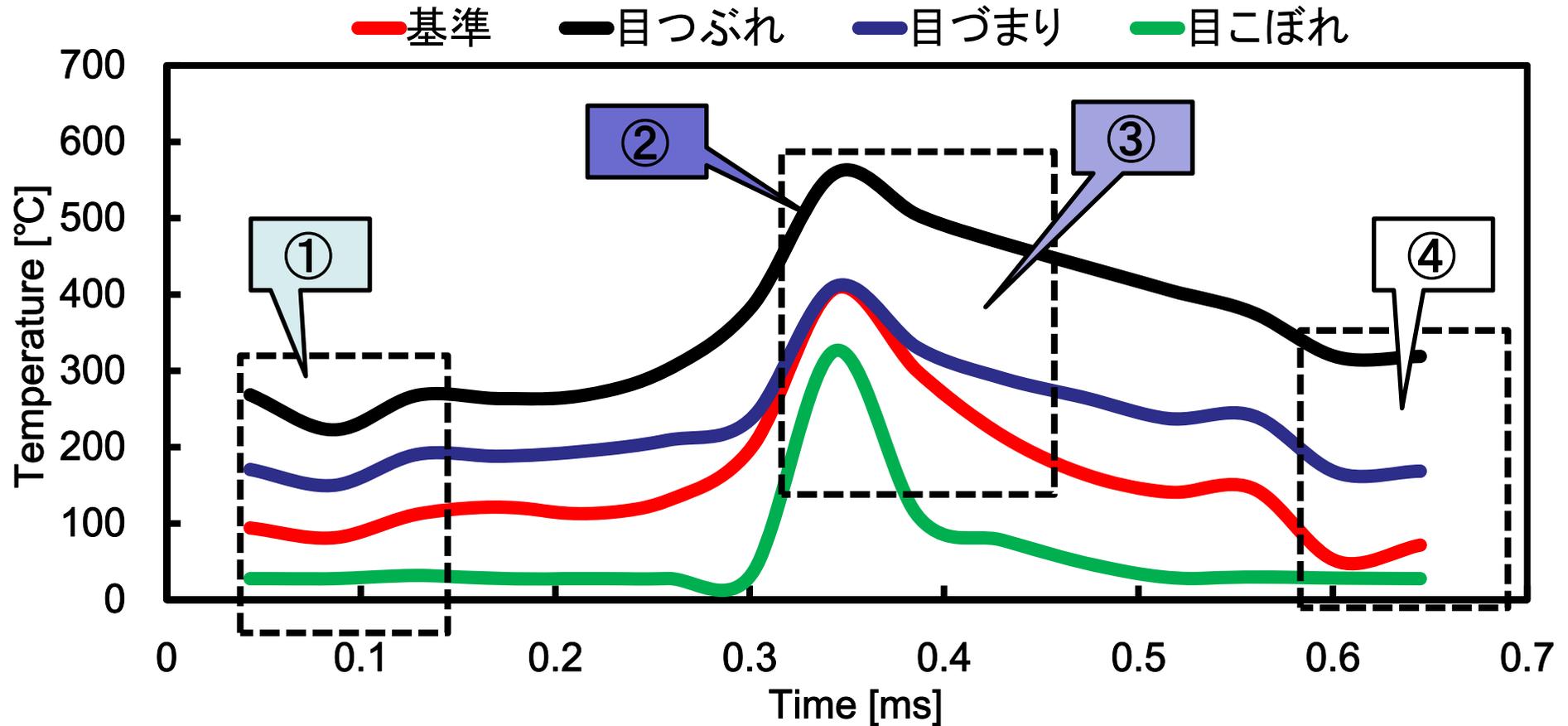


砥粒の脱落

Number of machining	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature °C	198	382	317	310	383	361	390	341	311	254

比較的低温で温度上昇があまり見られない(砥粒脱落による影響)

平均した加工領域における砥石表面の温度変化



①測定開始時の温度

②最高温度

③最高温度からの温度下降勾配

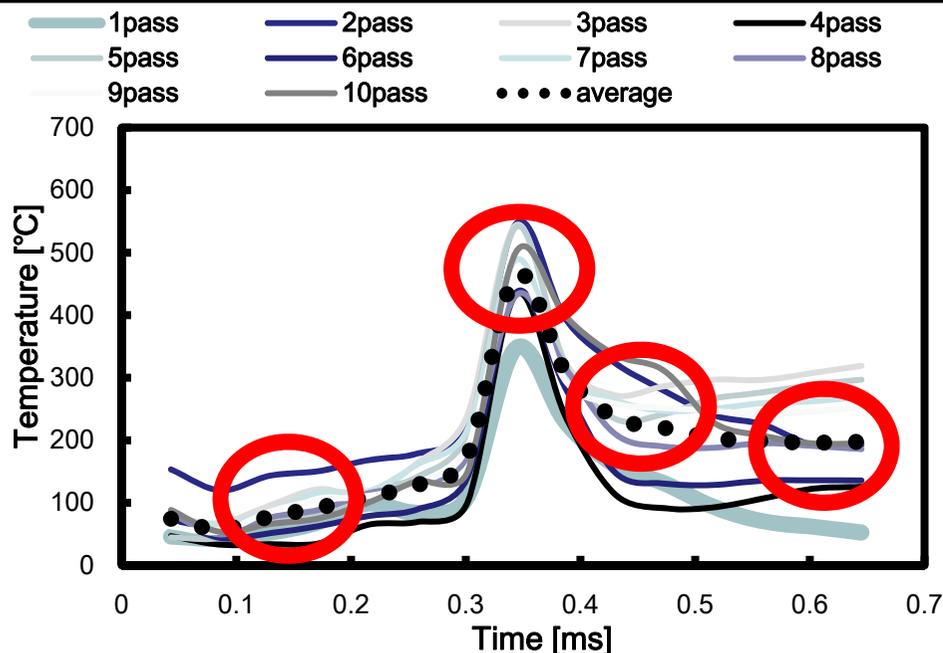
④測定終了時の温度

砥石表面温度の変化のみから研削状態を判別

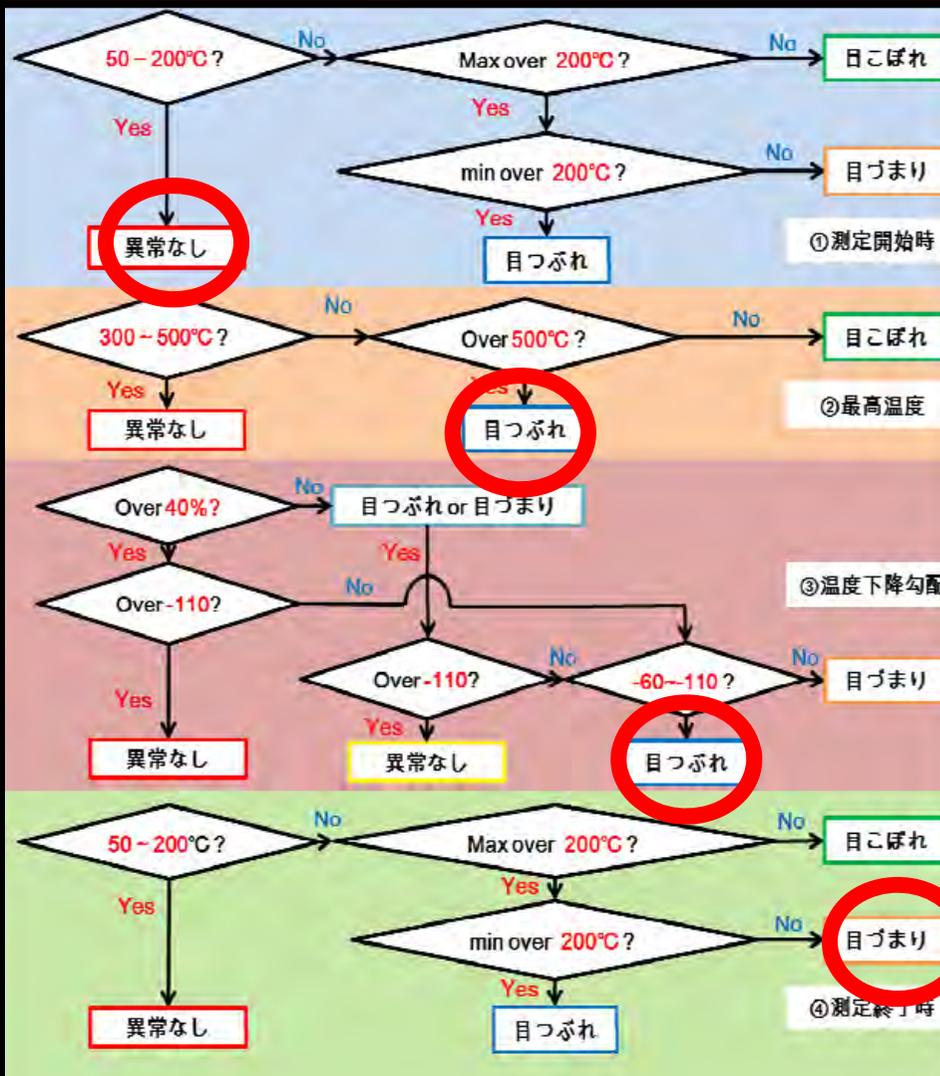
実験条件

Grinding velocity	m/s	15.71
Feed rate	mm/min	500
Depth of cut	mm	0.04 (10 pass)
Grinding method		up cut , down cut
Type of coolant supply		dry
Material of workpiece		S50C
Grain		WA
Grain size		#80
Structure		K
Grade		14

温度測定結果



アルゴリズム

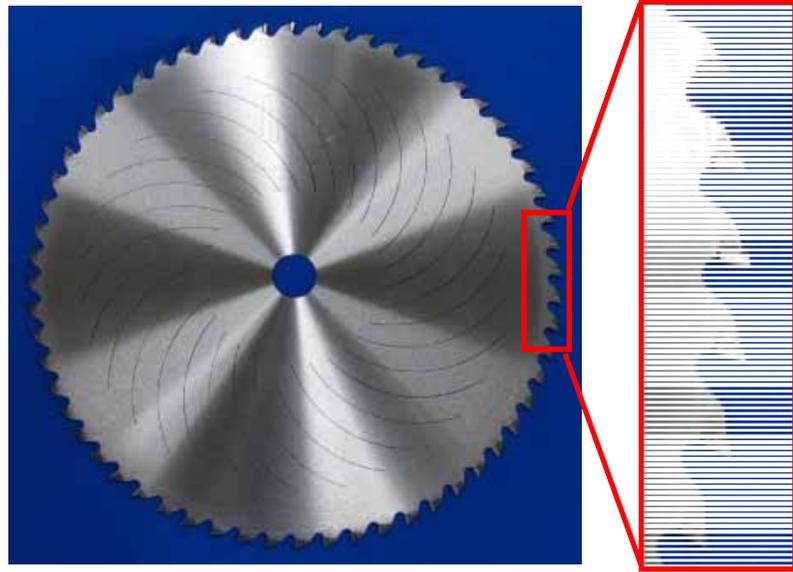


目つぶれと目づまりの可能性

曲線切断丸のこによるCFRPの高効率加工

Y. Yamada and H. Sasahara, Free-form curves cutting using flexible circular saw,
Precision Engineering, 38, 3 (2014) pp. 611-616. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.02.011

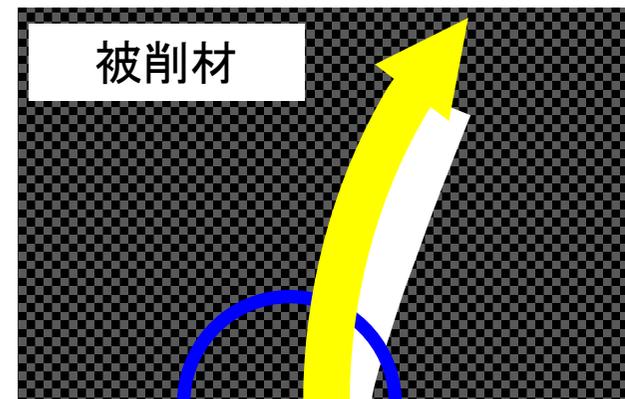
丸のこ



- ・切れ刃が多い
- ・回転速度が高い

送り速度 3000mm/min
他加工法の2倍以上

丸のこは
直線切断を目的とする工具



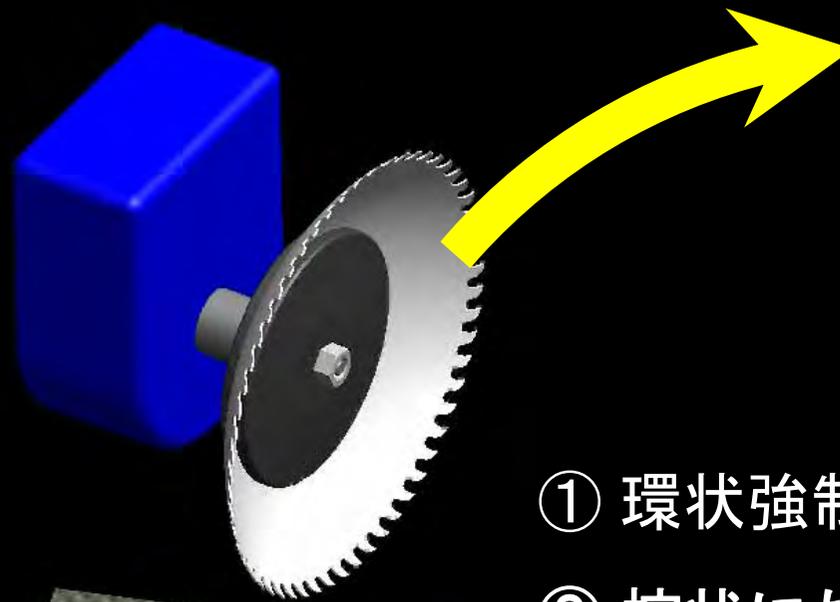
干渉

困難 丸のこによる曲線切断

新CFRP加工技術

曲線切断丸のこ

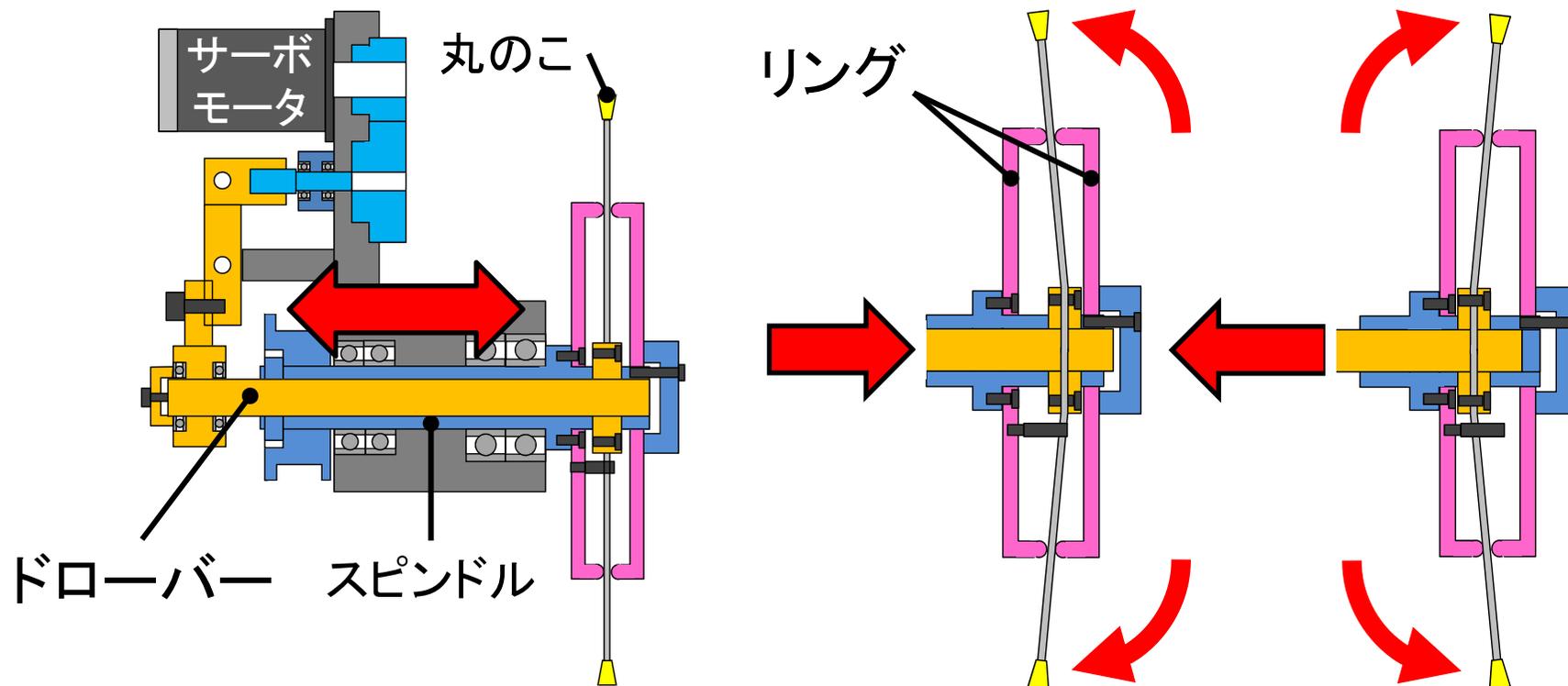
曲線切断丸のこ



- ① 環状強制変位を与える
- ② 椀状にたわませる
- ③ 断面を円弧状に変形
目標形状と一致させる

高能率曲線切断を実現

曲線切断丸のこ

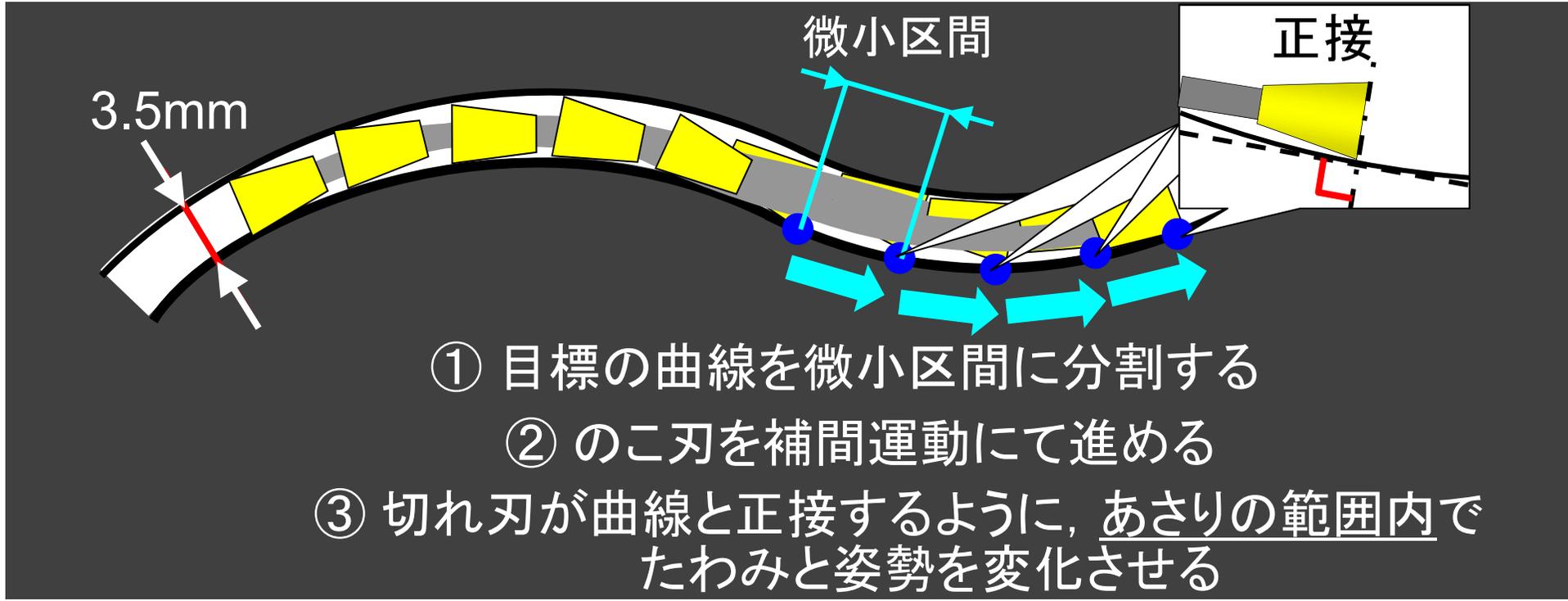
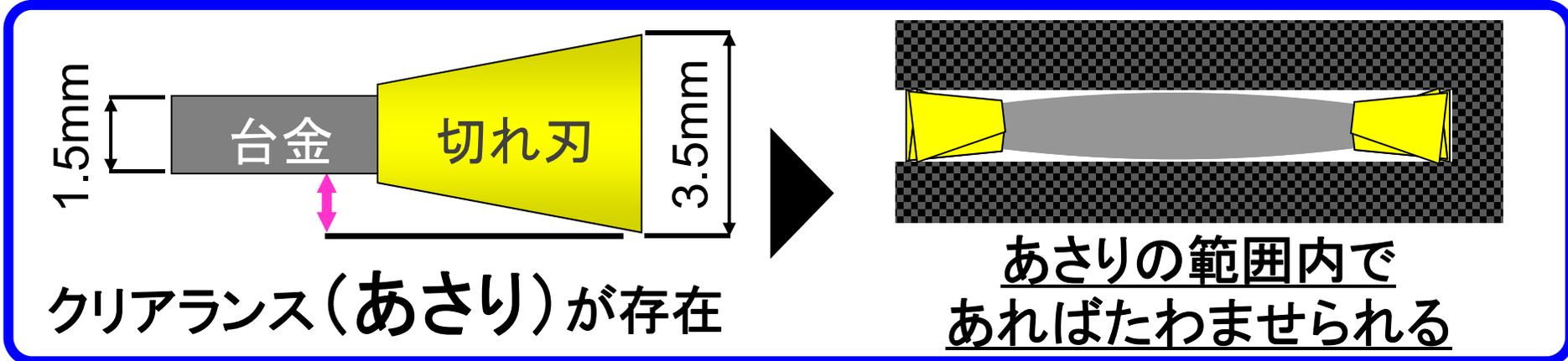


ドローバーの変位を変化させることによりたわみを変化

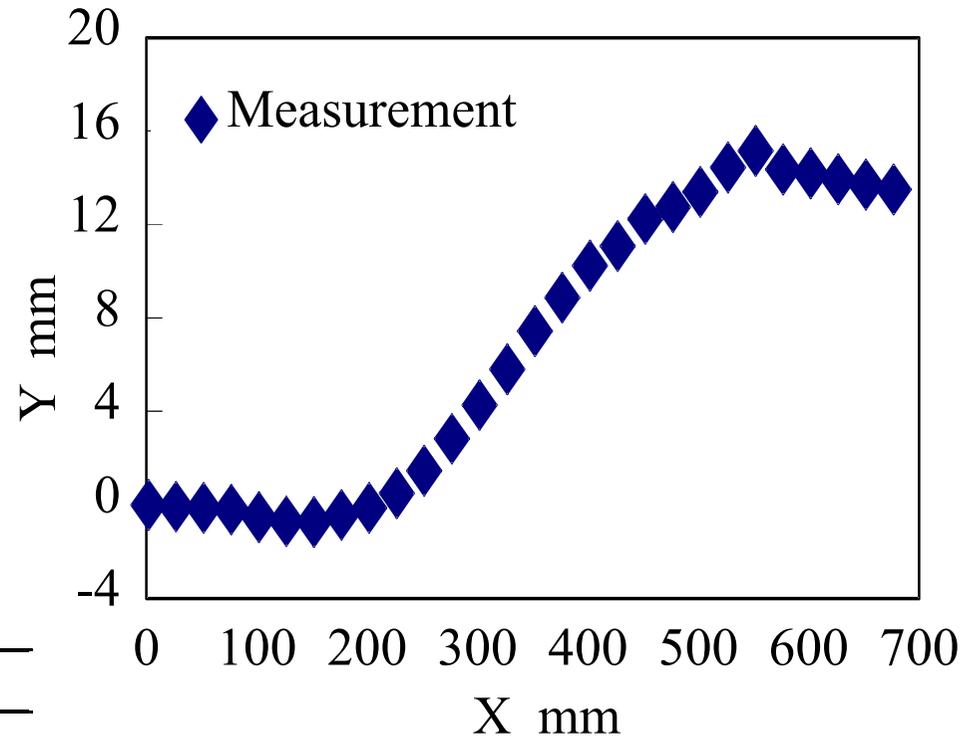
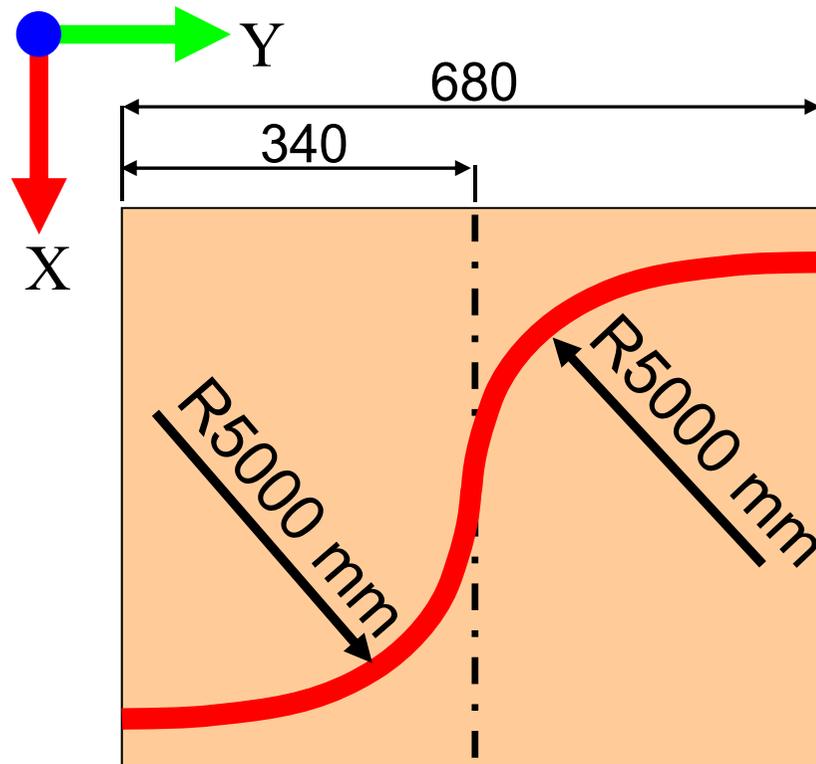
一枚ののこ刃であらゆる曲率の曲線切断が可能

目的

曲線切断丸のこを高精度・高能率
CFRP切断加工技術として確立



曲線切削加工方法により自由曲線加工が可能

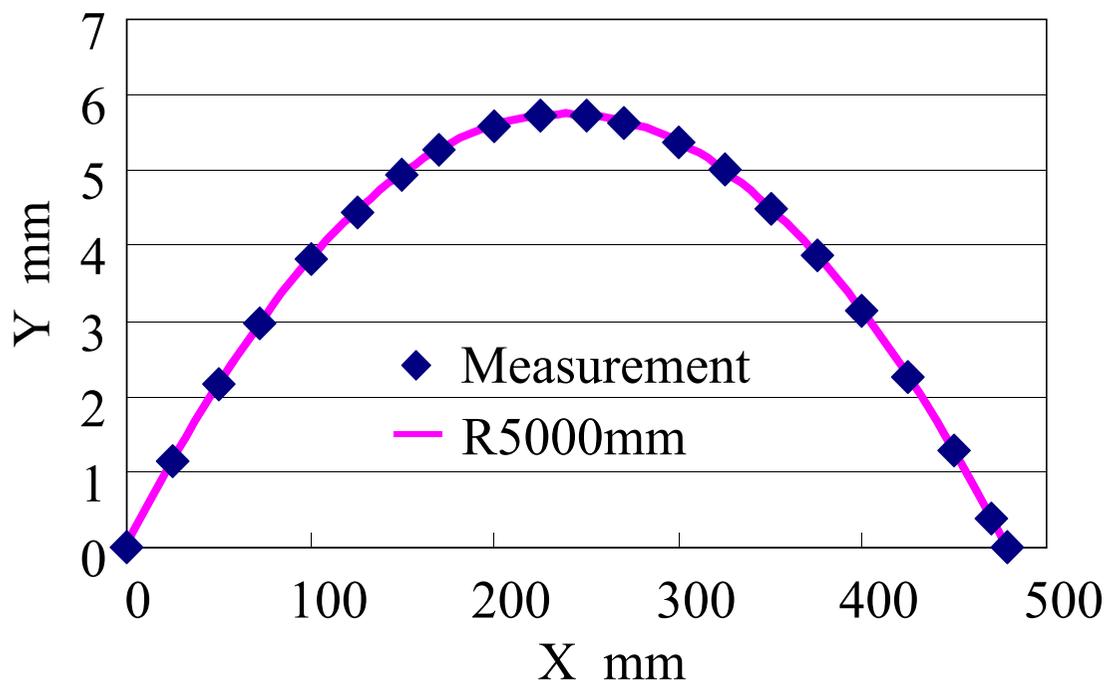


Material		Blockboard
Material thickness	mm	10
Feed rate	mm/min	3000
Spindle speed	min ⁻¹	3000
Cutting direction		Up cut
Saw diameter	mm	305

自由曲線を加工することが可能



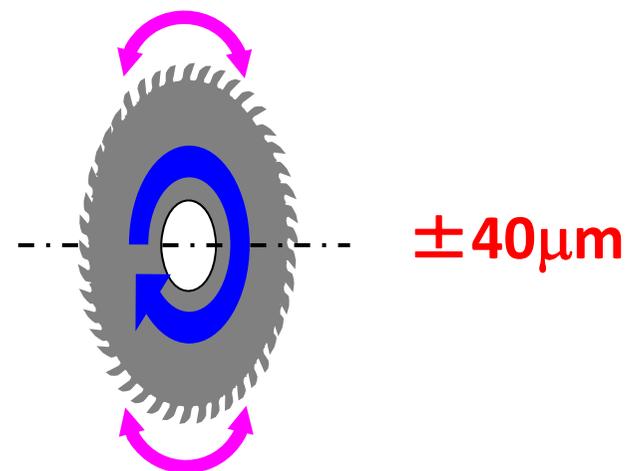
加工断面の輪郭形状
を三次元測定機によって形状測定



形状精度: **104 μ m**

曲率半径: **R4995.1mm**

誤差の原因



- ・のこ刃のふれ
- ・工作機械自体の誤差

**CFRPの
曲線切断可能**

CFRPの切削特性 ～実験条件～

ダイヤモンドチップソー



60個の
PCD(多結晶ダイヤモンド)
の切れ刃

直径: 305mm
台金厚さ: 1.5mm
切れ刃幅: 3.5mm

被削材



航空機用CFRP
(配向方向 0° 45° 90° -45°)

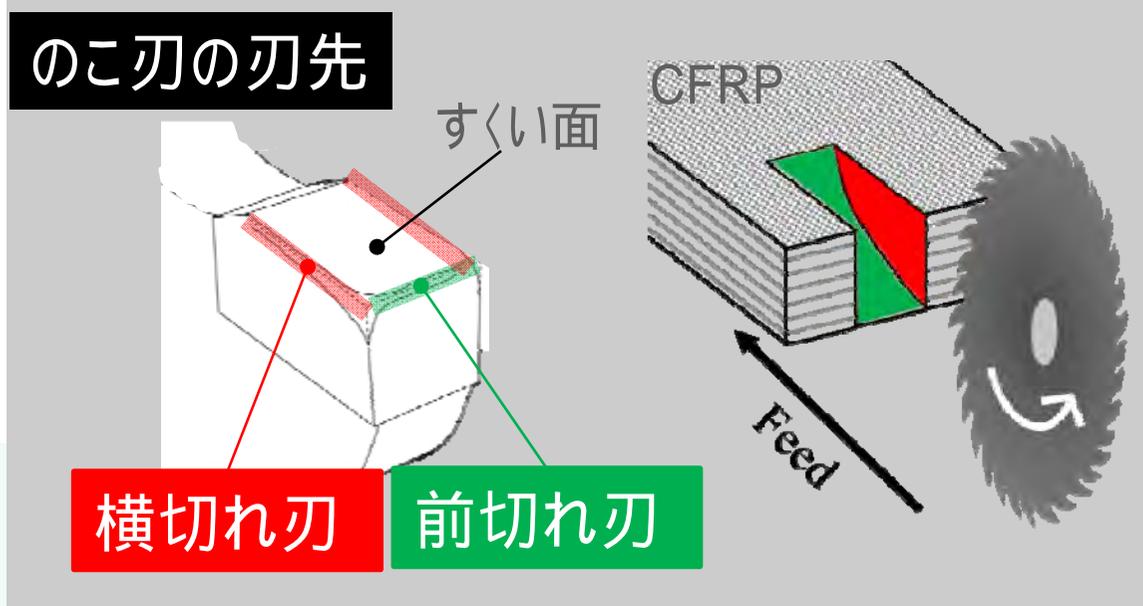
切削条件

エンドミル加工と比較

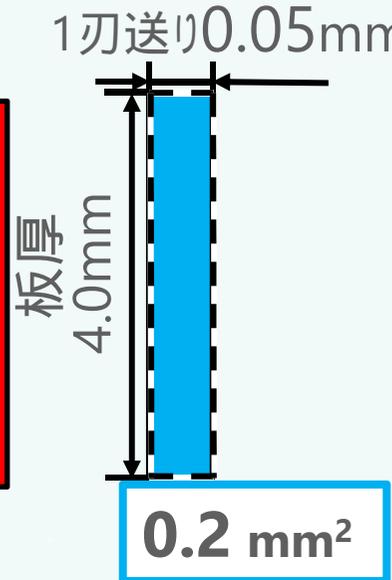
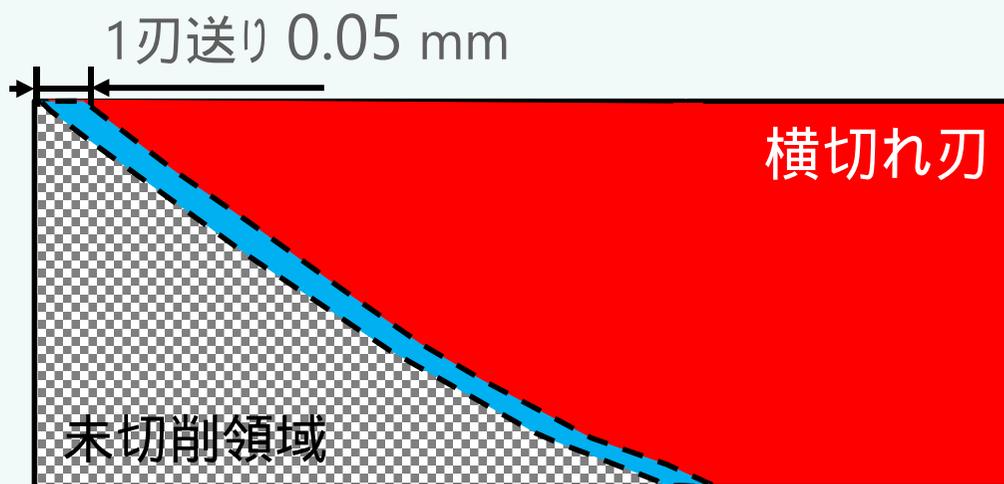
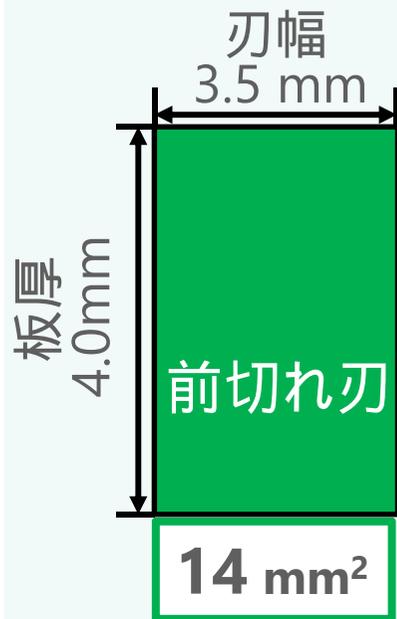


Tool		PCD circular saw	Diamond coated endmill
Material		CFRP	
Material thickness	mm	8	
Feed per tooth	mm/tooth	0.017	
Feed rate	mm/min	3000	500
Spindle speed	min ⁻¹	3000	7352
Cutting speed	m/min	2875	185
Depth of cut	mm		3.5
Cutting direction		Down cut	
Coolant supply		dry	

のこの刃の刃先



投影断面積



切削断面積

前切れ刃

横切れ刃

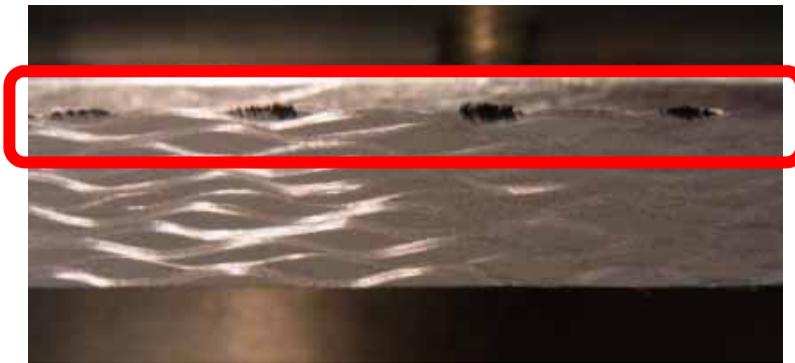
150 mm, 2250 mm切削後の加工断面を観察

ダイヤコートエンドミル

150 mm



2250 mm



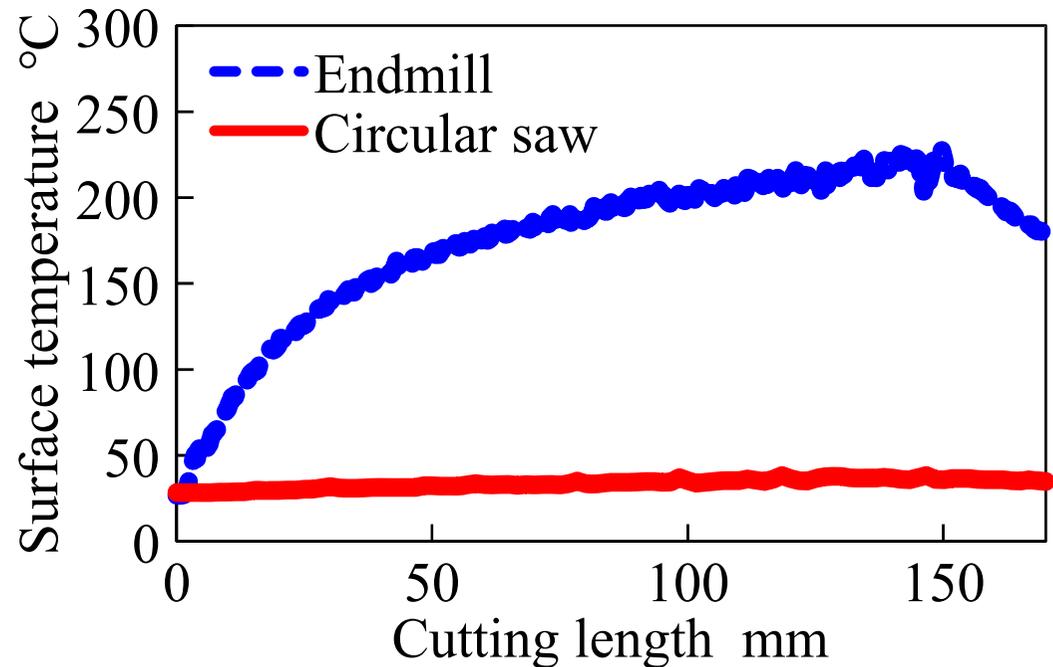
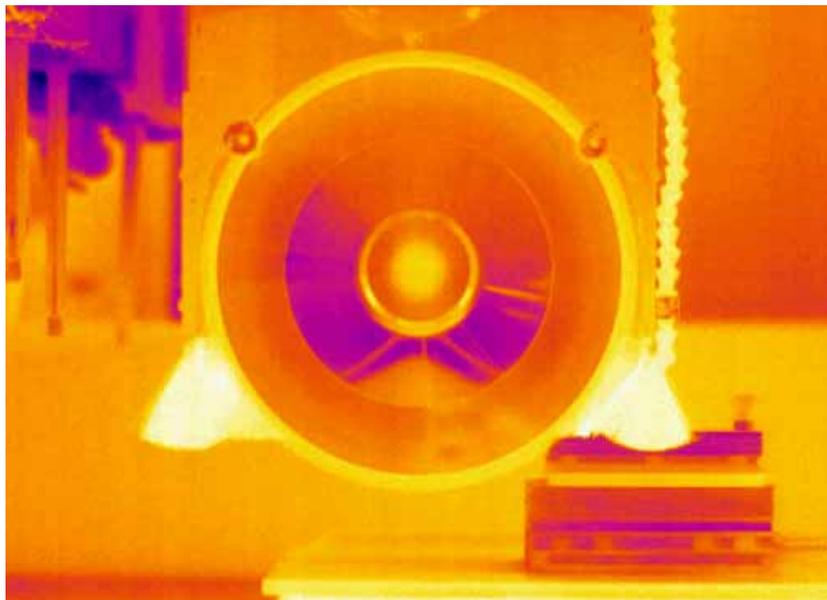
全ての加工において
ファイバーアウトが発生

曲線切断丸のこ



全ての加工において
滑らかで良好な加工面

曲線切断丸のこは炭素繊維一本一本をしっかりと切り取る



曲線切断丸のこ：CFRP加工時の工具表面温度は低い

- ・60枚の多くの切れ刃 ▶ 一刃当たりの実切削距離が短い
エンドミル：**169 m** 曲線切断丸のこ：**48 m**
- ・工具直径が大きい ▶ 非切削時間が長い

1. 砥石内研削液供給による高能率形状研削
2. 砥石内研削液供給によるCFRPの研削加工
3. 砥石表面温度のモニタリングによる研削状態の判別
4. 曲線丸のこによるCFRPの高能率切断

ご静聴ありがとうございました