

共同研究テーマ4

機械加工のデジタル化技術開発

ー研削シミュレーションを用いた高速加工技術開発ー



木崎通
講師

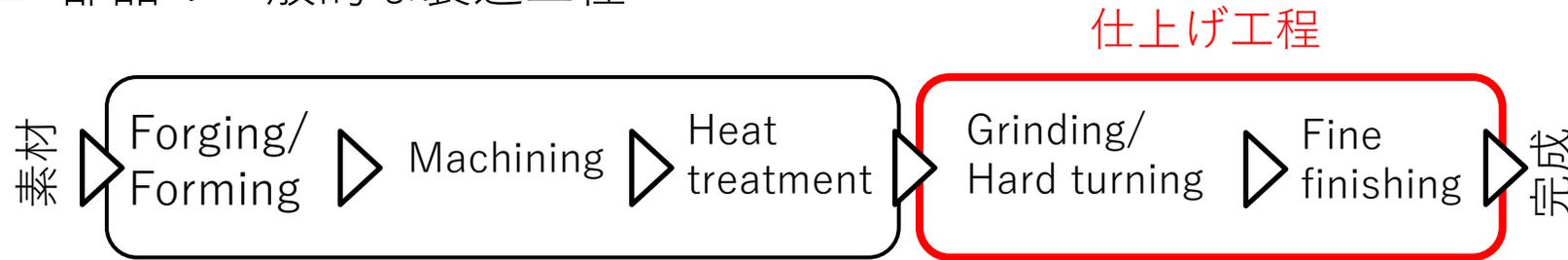


杉田 直彦
教授

共同研究者@2024
東京大学：王 超[D3]、任 浩南[M2]、斎藤 樹[M1]
ダイキン工業：原田 真征、西澤 孝行、松本 暢二

量産における仕上げ工程とその課題

■ 部品一般的な製造工程



■ 仕上げ工程の課題

仕上げ工程が部品の最終品質を決定。
(e.g. はめあい, 表面粗さ. . .)

多数の切れ刃(砥粒)が複雑に作用するため、加工条件の探索がトライ&エラー



量産に向けた加工条件決定のために膨大な工数が必要.

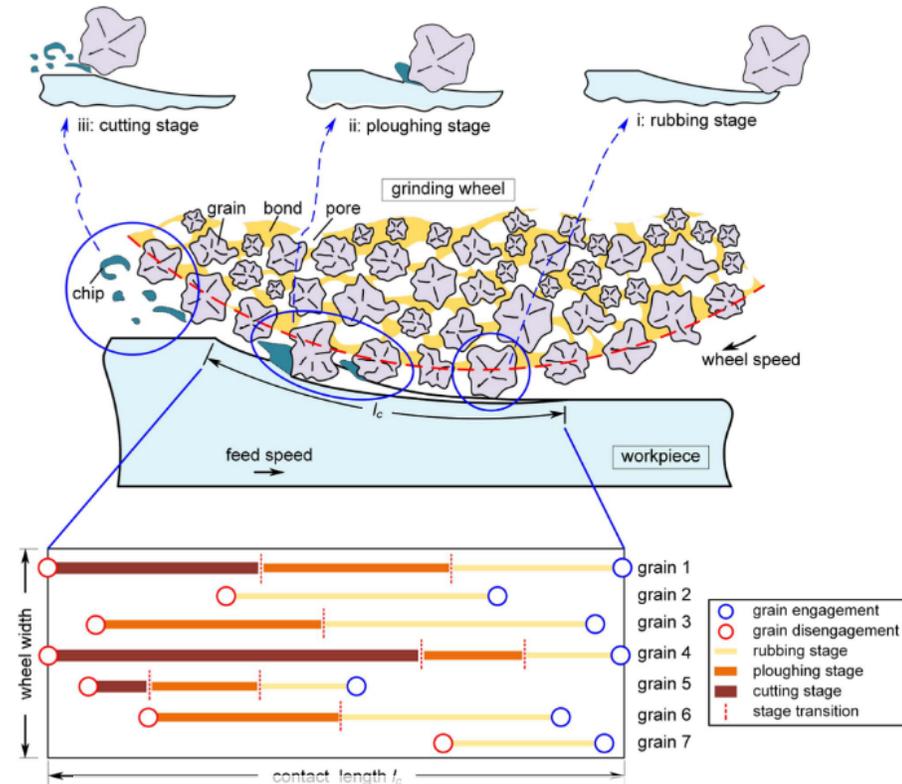


本研究の目的

加工条件の探索を容易にする
砥粒加工(仕上げ工程)のDigital Twinを実現すること



研削による仕上げ(内径研削)

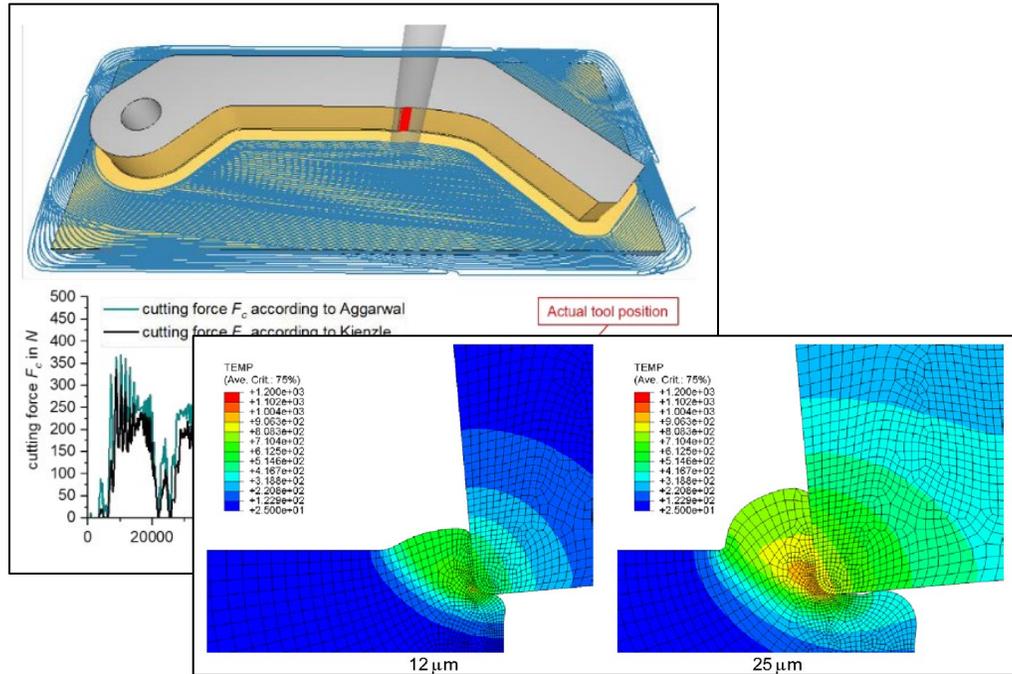


複雑な研削のメカニズム

仕上げ工程(内径研削)

Digital Twinの先行事例

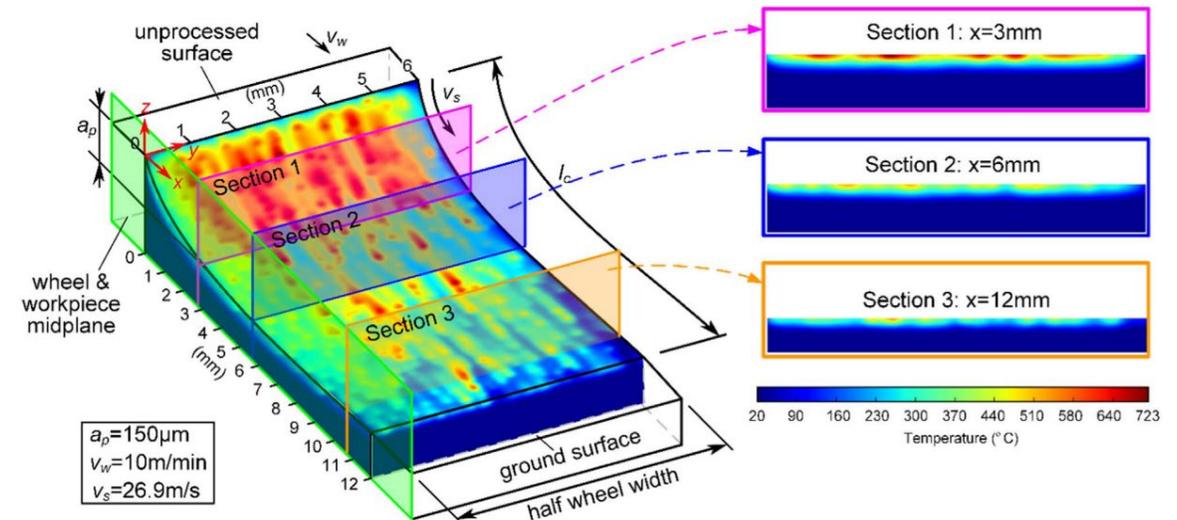
例えば，“切削加工”であればツールが充実



切削加工におけるシミュレーション・Digital Twin

砥粒加工は非常に多く (~100万) の切れ刃が作用する
=> 切れ刃数が限定的な切削と比較し、シミュレーションが困難。計算負荷高。

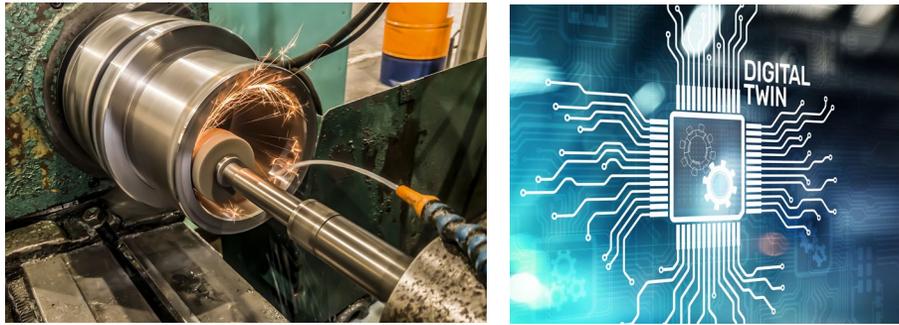
一方、砥粒加工においては限定的



砥粒加工のシミュレーション

平面研削において、 $500\mu\text{s}$ という極短時間のシミュレーション。
時間的・空間的にマイクロな現象は再現できるが、加工条件の探索には不向き。

砥粒加工のDigital Twin 概要



仕上げ工程(砥粒加工)のDigital Twin



工作物の品質

- 表面性状
- “焼け”
- 残留応力
- 形状精度

砥石の状態

- 摩耗
- 脱粒
- 目詰まり
- 砥石寿命

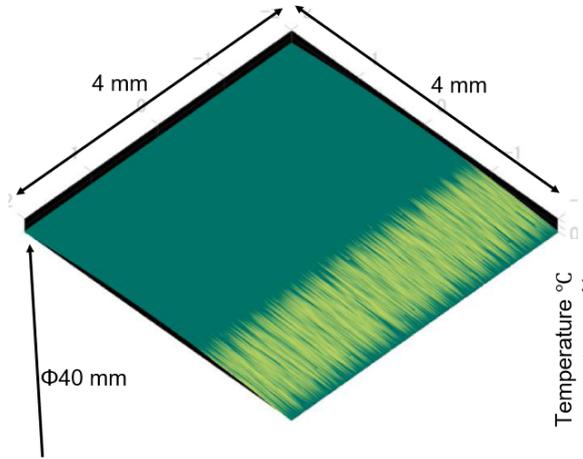
新たな砥石や新たな材料に対する仕上げ加工を再現

- 加工条件の探索・決定
- 加工不良の原因究明
- より“攻めた”加工条件により，高能率・高精度加工を実現

現在，具体的に以下の2点に取り組んでる。

1. シミュレーションプラットフォームの構築
2. 入力パラメータを決定するための仕組み

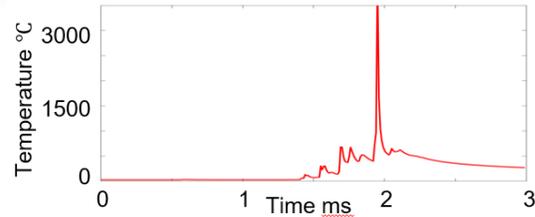
1. 研削シミュレータ



工作物が除去される様子
(Color mapは切り取り厚さ)

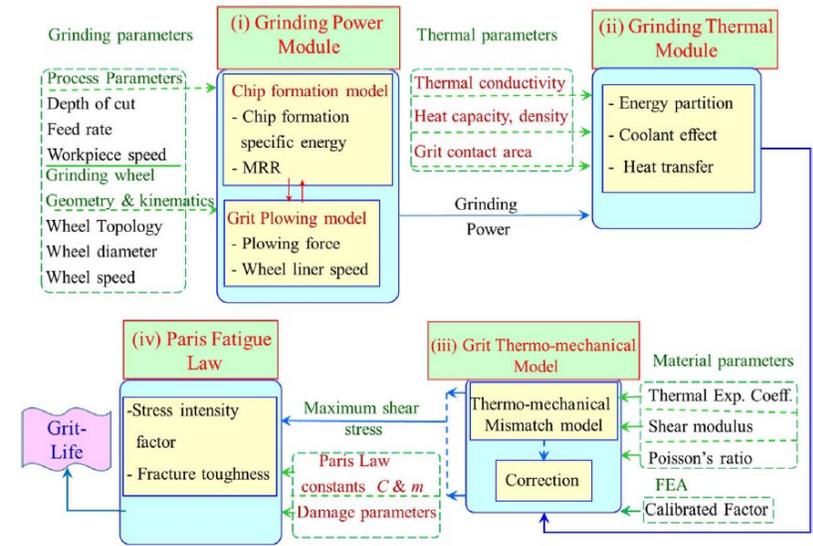
加工条件

Diameter of grinding wheel	30 mm
Grinding speed	29 m/s
Depth of removal	8.5 μm
Diameter of workpiece	40 mm
Rotate speed of workpiece	1 m/s
Time of simulation	3 ms
Time step	10 μs

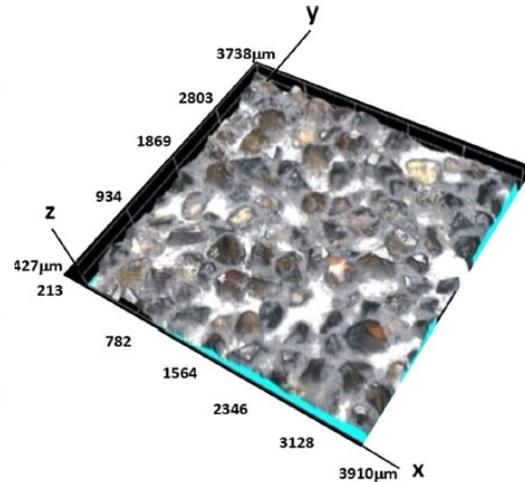
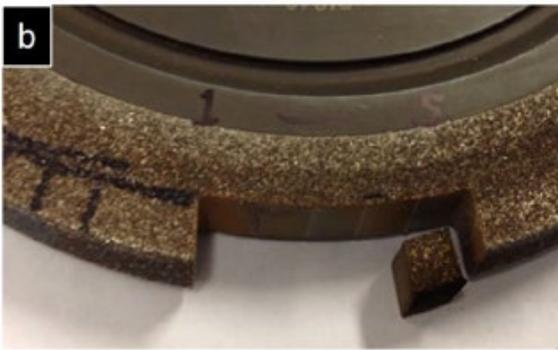


工作物表面(ある一点)の温度変化

2. 砥石寿命予測(摩耗モデル)



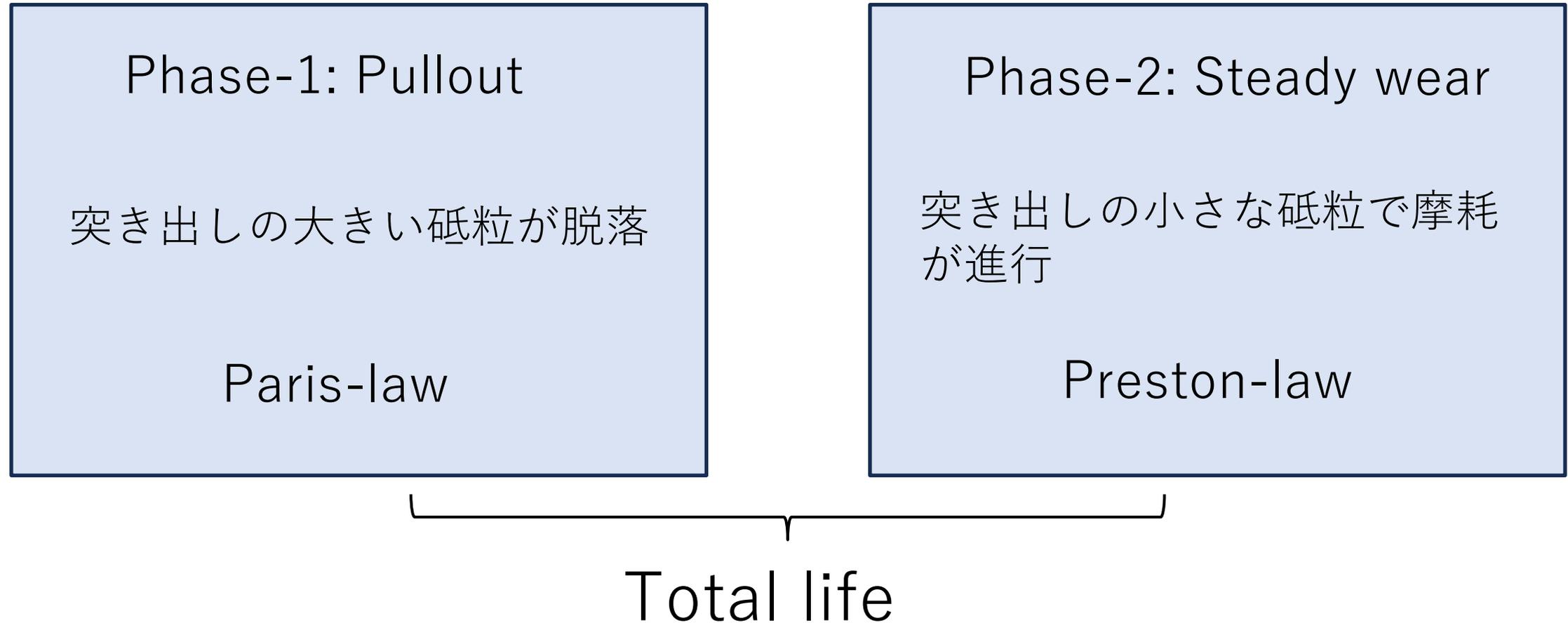
3. 砥石表面の三次元形状測定&評価



4. 研削盤の改良&加工実験



2. 研削における摩耗の進行プロセス



摩耗モデル構築

研削パラメータ

- プロセスパラメータ
- 切込み
 - 送り速度
 - ワーク速度

- 砥石の形状
- 形状
 - 直径
 - 速度

(i) 研削エネルギー

- 切りくず生成モデル
- 切りくず生成エネルギー
 - 除去体積

- 砥粒 plowing モデル
- Plowing 力
 - 砥石速度

- 熱パラメータ
- 熱伝導率
 - 比熱, 密度
 - 砥粒接触面積

(ii) 研削熱モジュール

- エネルギー
- 冷却効率
- 熱伝導

研削力

(iv) Paris 疲労則

- 応力拡大係数
破壊靱性

砥粒寿命

最大せん断応力

Paris則パラメータ

(iii) 砥粒 熱-機械モデル

- 熱-機械
Mismatchモデル

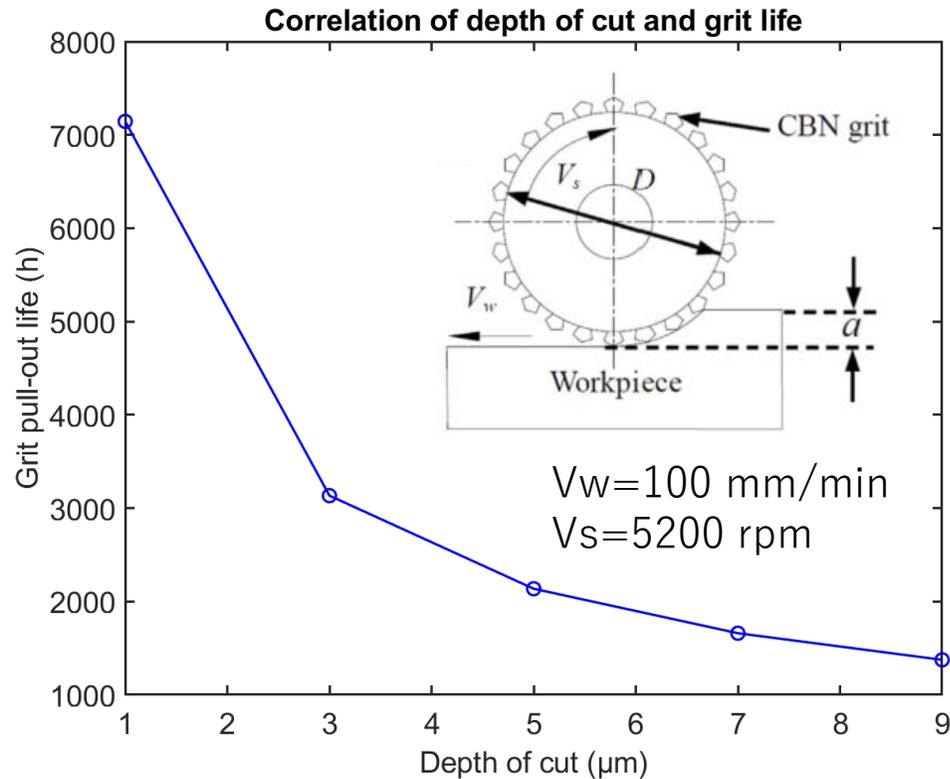
修正

- 材料パラメータ
- 熱伝達率
 - せん断係数
 - ポアソン率

- FEA
- キャリブレーション

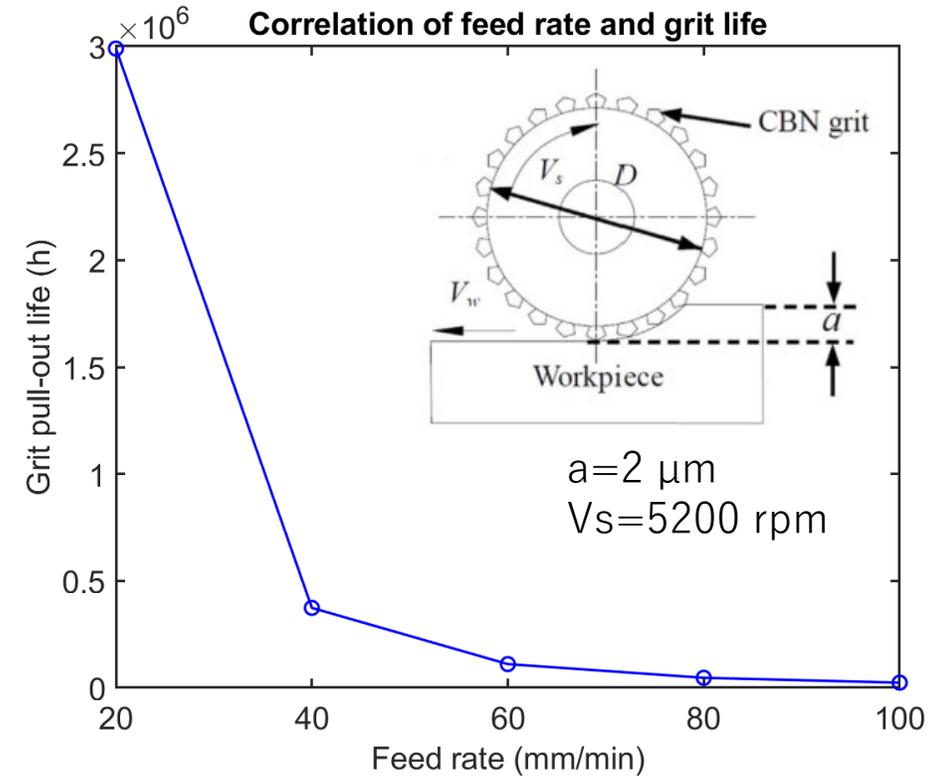
砥石寿命予測結果

切り込み深さと寿命の関係



切り込み深さ，送り速度の向上は砥粒の脱落を促進する：直感と同じ

送り速度と寿命の関係



高い送り速度のほうが脱落による砥石の摩耗の促進効果が顕著：直感と同じ

結論

突き出し量大きいの砥粒の脱落に対する予測モデルを構築した

展望

- 砥粒の三次元形状，弾性定数などの値を特定する
- 安定摩耗モデルの構築
- モデル結果を実験で検証する

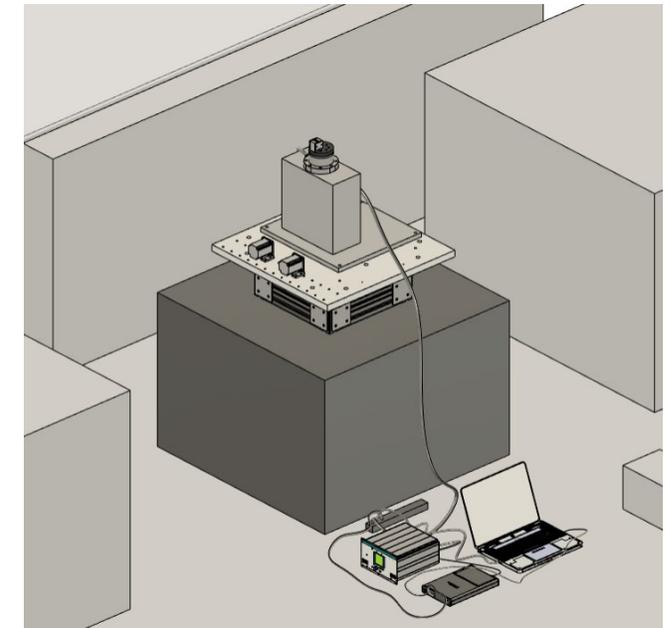
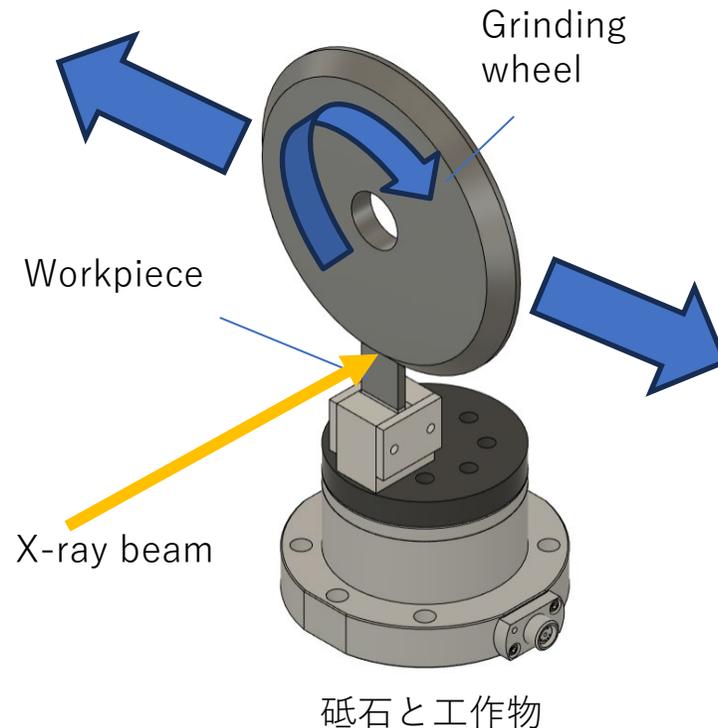
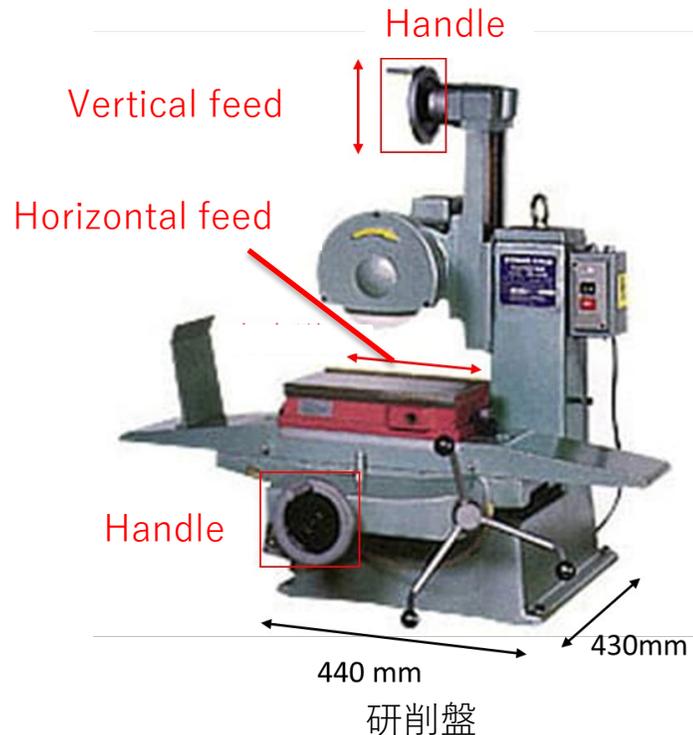
3. Spring-8を利用した研削現象の観察

■ 目的

加工中砥石-工作物界面に生じた現象の直接観察

■ 手法

- 各砥粒の接触長さ
- 切りくず生成, ploughing, 摩擦
- 接触点の分布
- 砥粒の摩耗と破損



□ 光学系

- 100keV高輝度放射光；
- 高速カメラ；

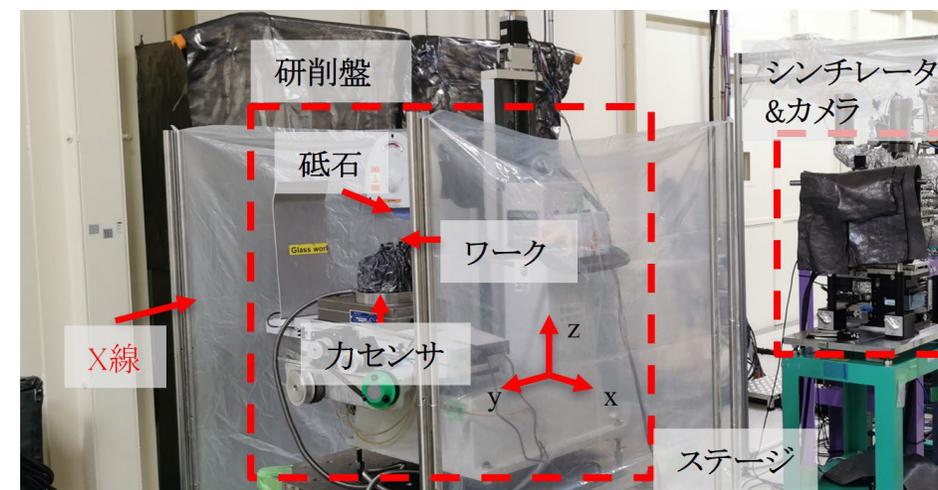
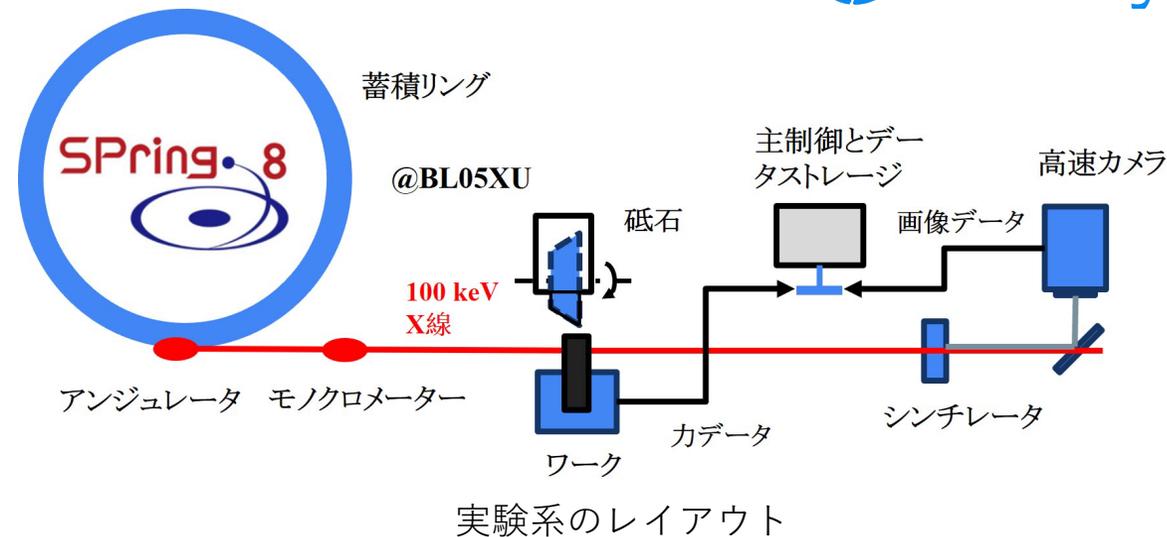
表 1. カメラ設定

録画速度 (fps)	露光時間 (ms)	ピクセルサイズ(μm)	解像度
10000, 1000	10, 20	4	992×400

□ 加工部

表 2. 研削条件

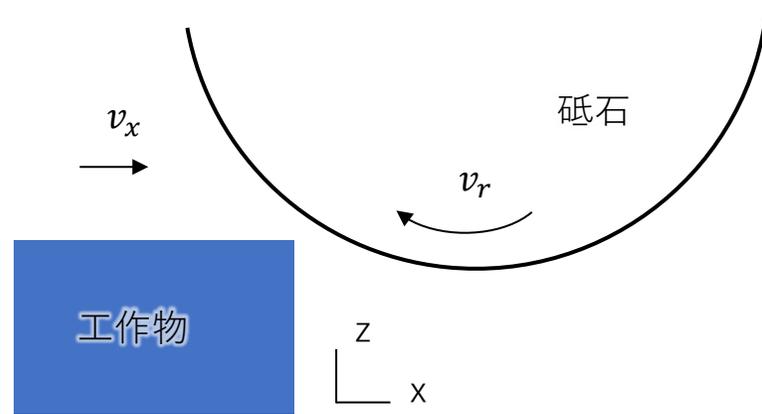
x 軸送り速度 (mm/min)	z 軸送り速度 (mm/min)	粒径範囲(μm)	砥粒材質
200	60	177~250	SiC, Al ₂ O ₃



研削装置の写真

結果と考察

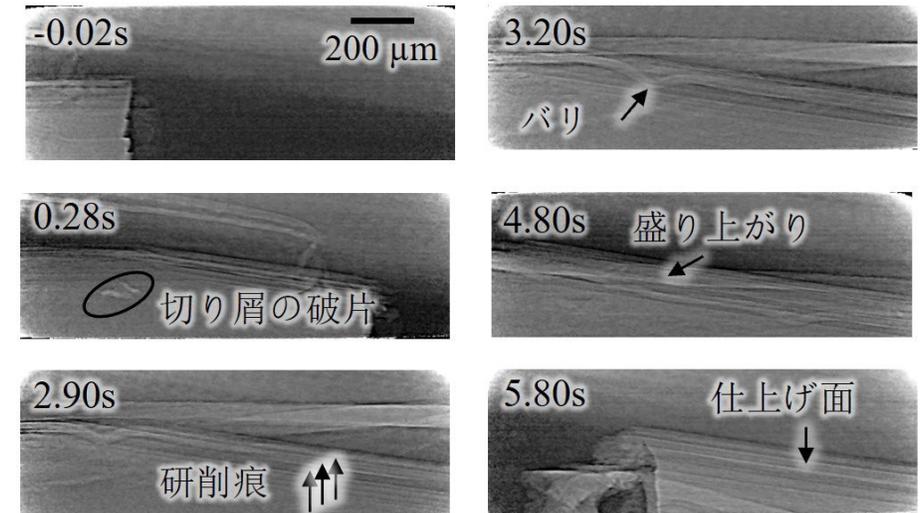
□ 平面研削



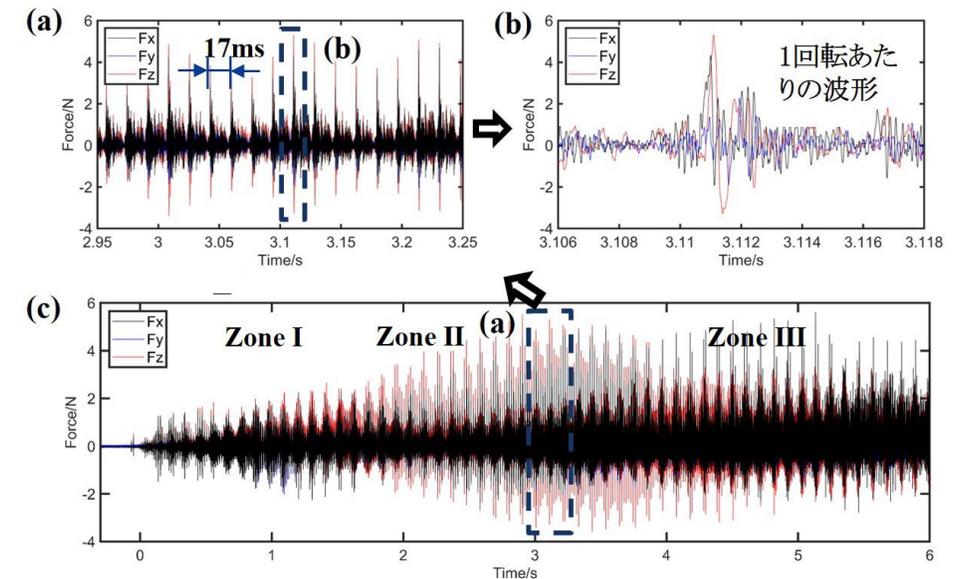
平面研削実験の説明図

- 平面研削中の諸現象を観察することが可能。
 - 微小切りくずの飛散
 - バリ, 盛り上がり ⇒ 加工中材料の塑性変形
 - 研削痕の生成, 更新
- Uncut chip thicknessの視点から, zone II と zone III における異なる材料除去メカニズムを説明できる

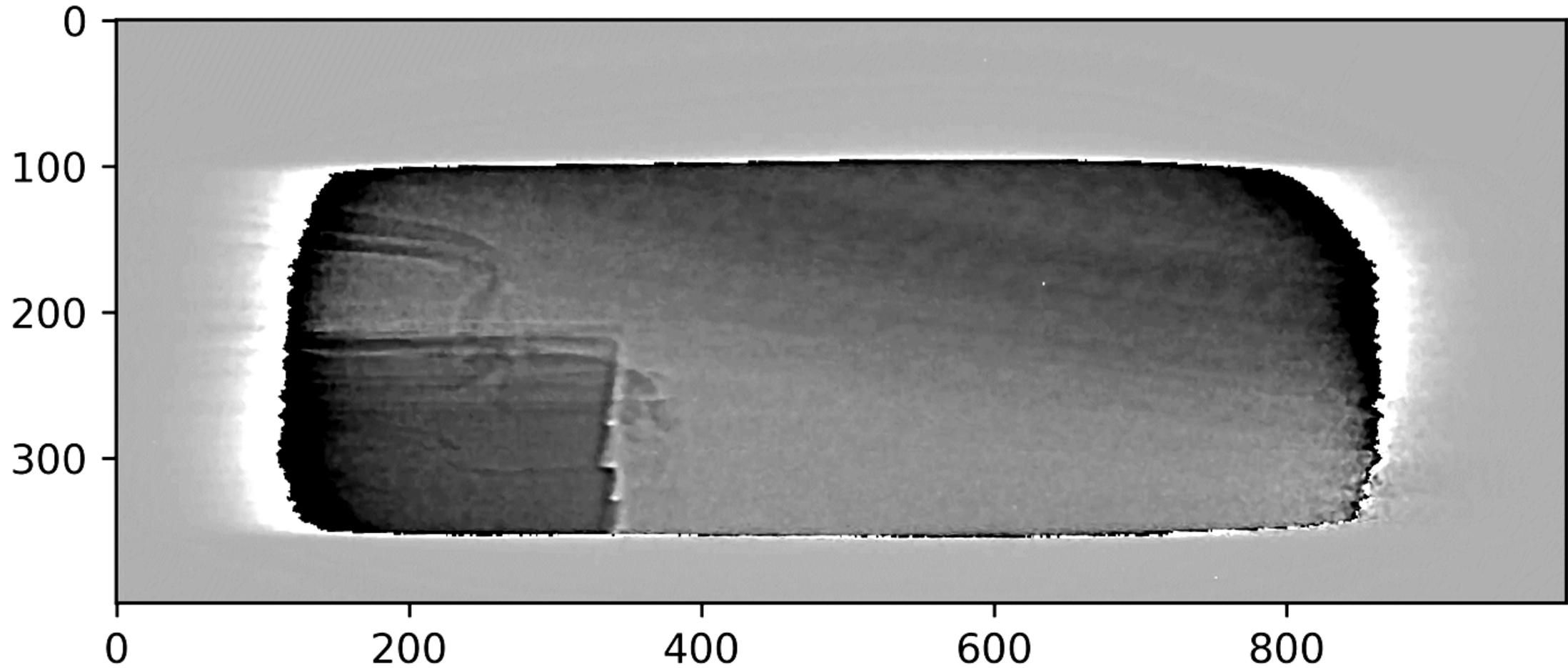
X線画像



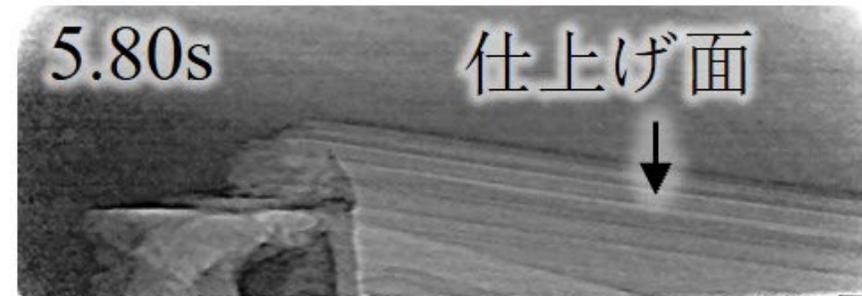
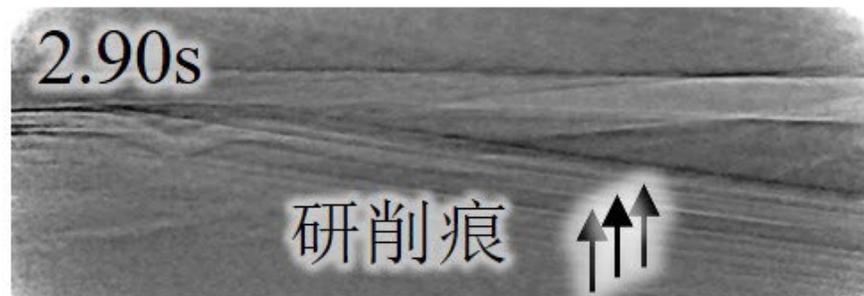
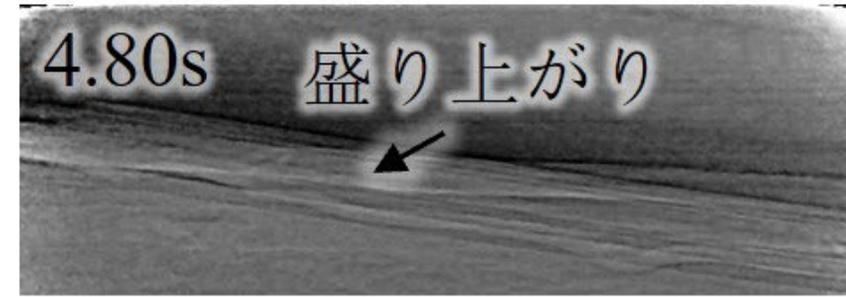
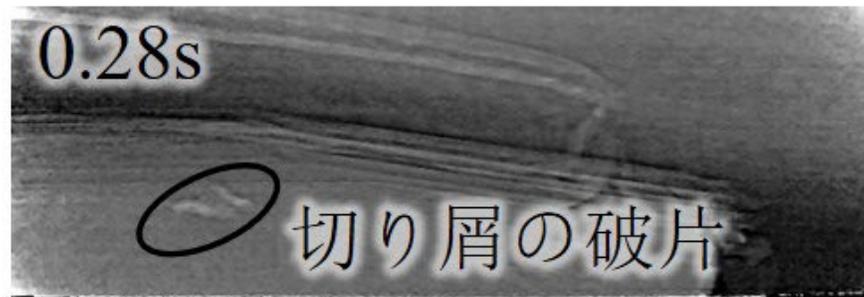
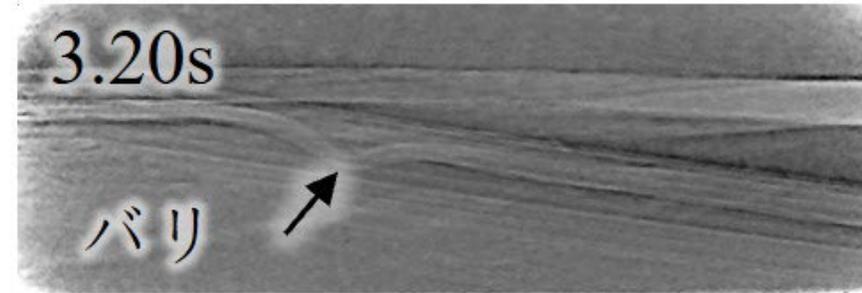
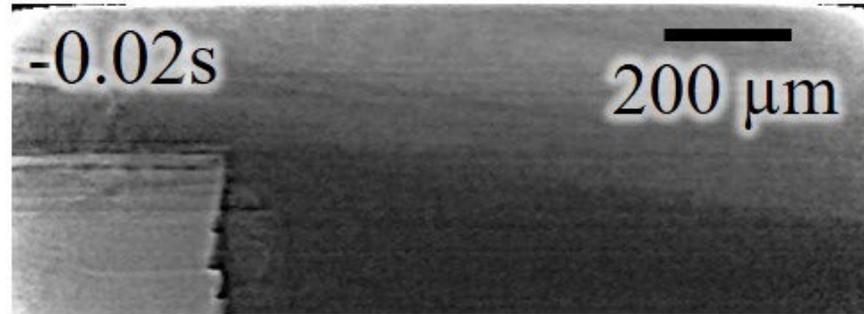
力データ



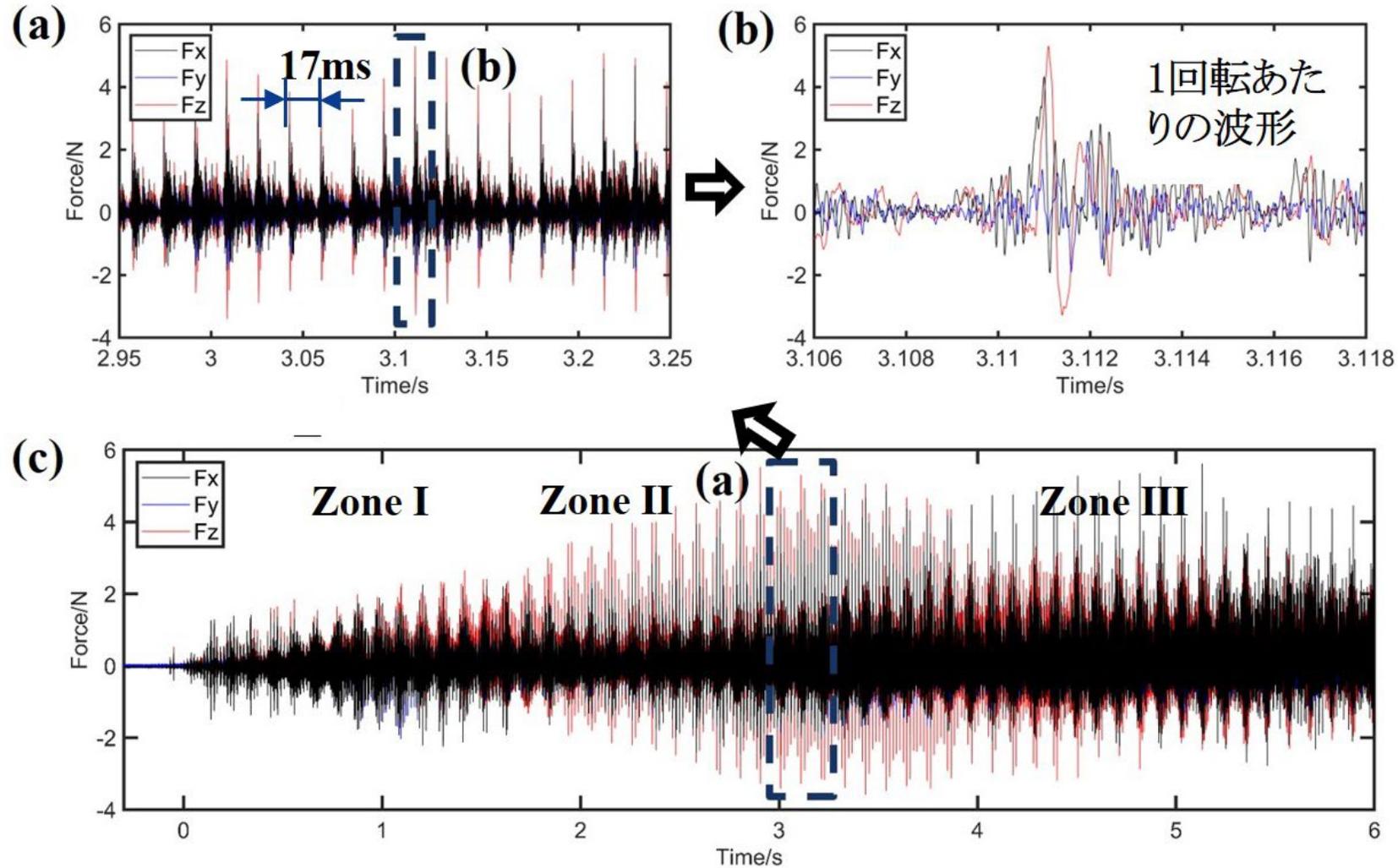
Fps: 30 : Skip every 200 frame



X線画像



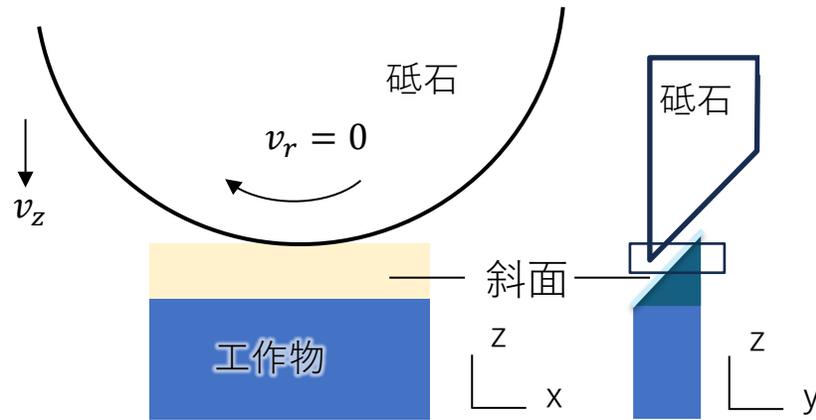
カデータ



Uncut chip thicknessの視点から、zone IIとzone IIIにおける異なる材料除去メカニズムを説明できる

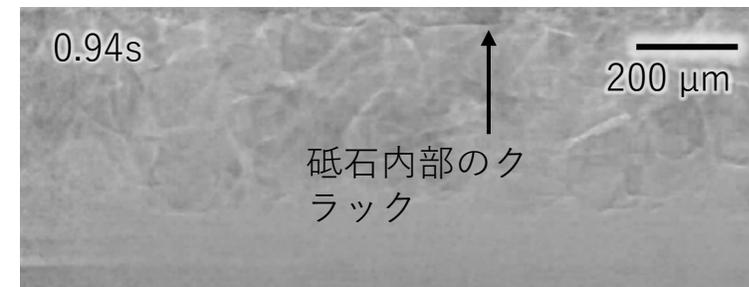
工作物斜面の平面研削

□ 斜面研削



斜面研削実験の説明図

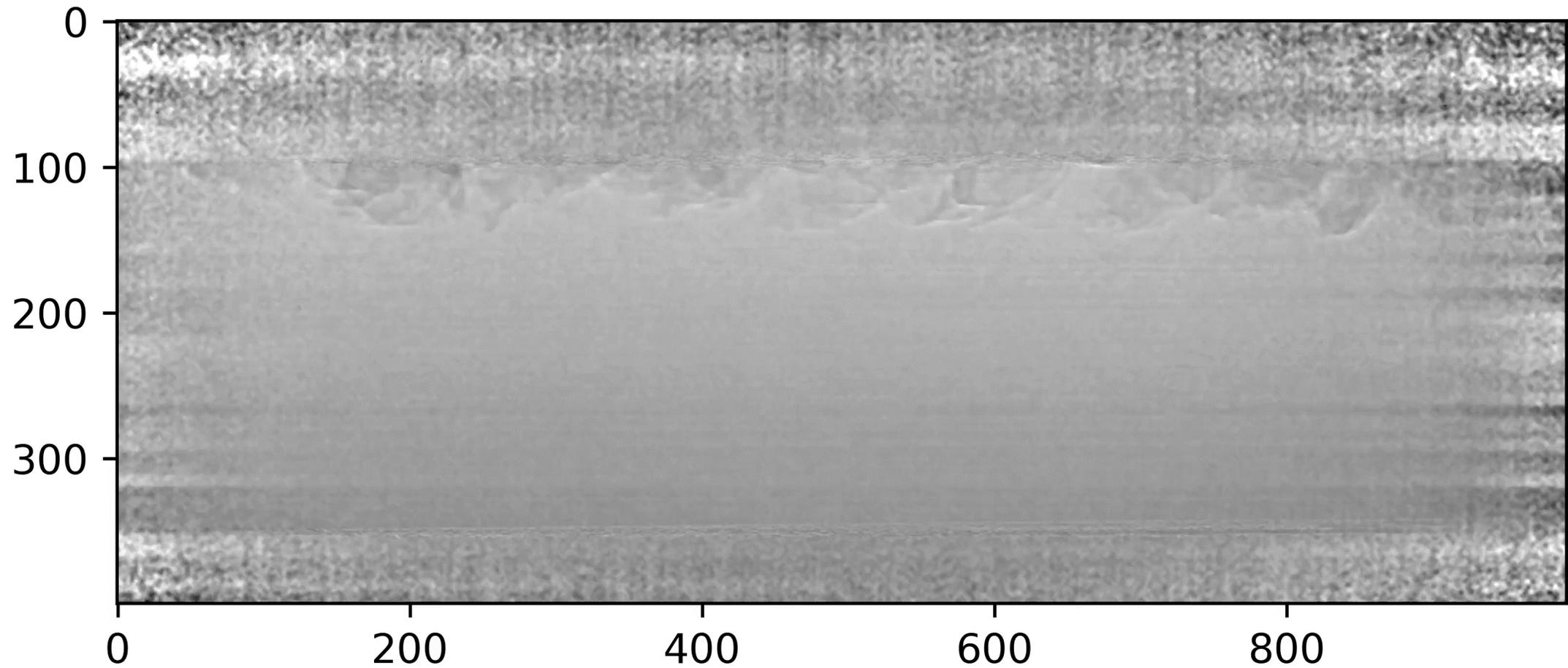
- 砥石は回転せずワークに衝突時の諸現象
 - 激しい切削条件での砥石の脱粒
 - 加工痕
- 砥石がワークより X 線の上流になるため、ワーク表面の特徴の特定が困難



加工動画(砥石回転なし)

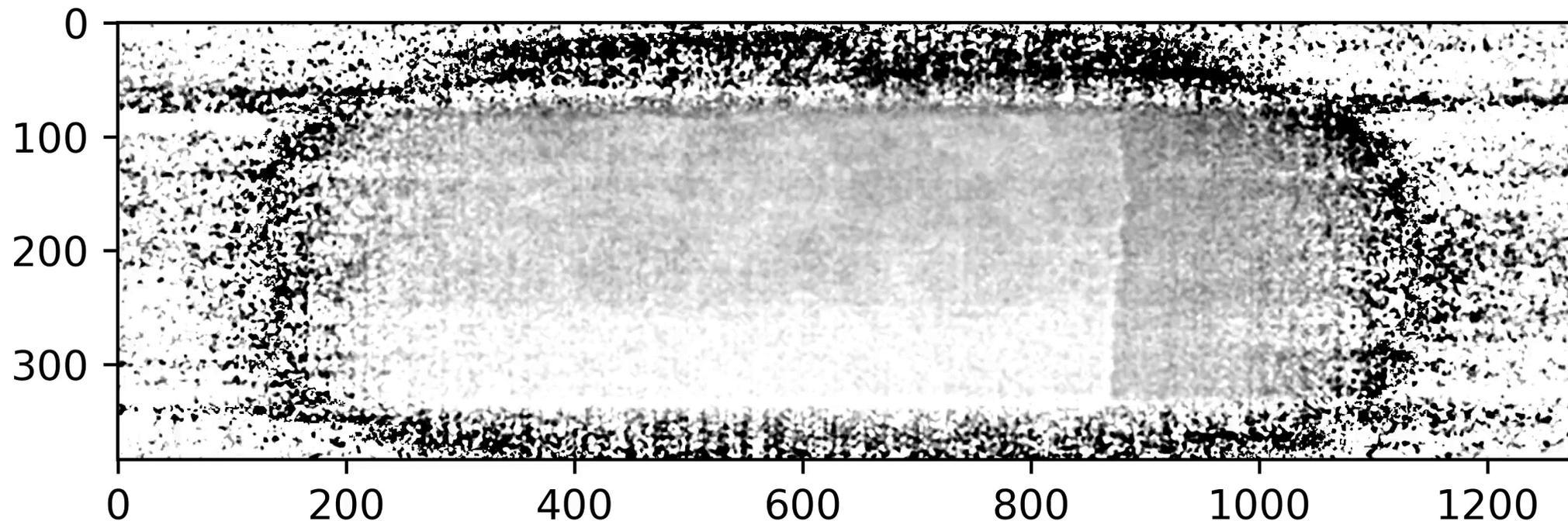
加工全般

Fps: 30 : Skip every 100 frame



加工動画(砥石回転あり, 工作物X方向移動)

Fps: 30 : Skip every 100 frame



砥石の回転とワークX軸方向の送りが見える。局所的な現象の視認が困難

研削の進行に伴う工作物内部の材料除去挙動を直接観察することが可能であった。

高輝度放射光が研削加工の加工メカニズムをより深く分析するための強力なツールとなりうることが示された

今後は時間的・空間的な解像度を向上させることにより砥粒スケールのマイクロな加工現象を捉える