

エンドミル加工と放電加工の 高精度化に向けて

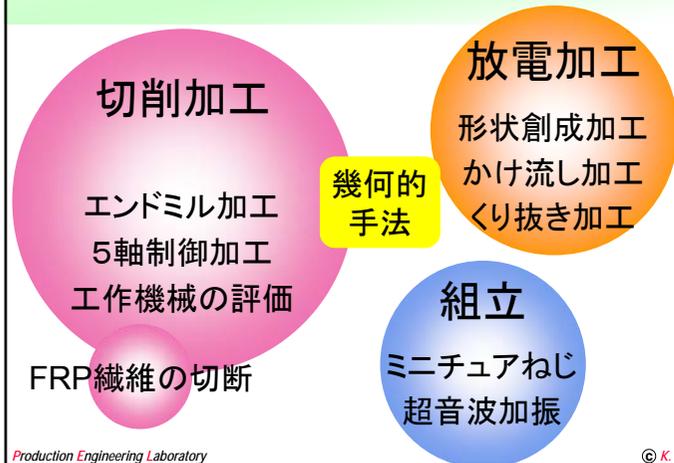
- 図形的なアプローチの紹介 -

九州工業大学技術交流会（三木会）
2017年11月16日

工学研究院 機械知能工学研究系
吉川浩一

1

研究分野

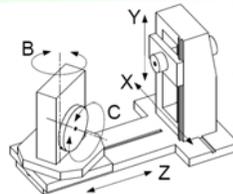


Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa 2

5軸制御エンドミル加工

- ◆ 可動軸: 直動3軸 (XYZ) + 回転2軸 (BC).
- ◆ 回転工具: 加工過程が複雑.



エンドミルの種類

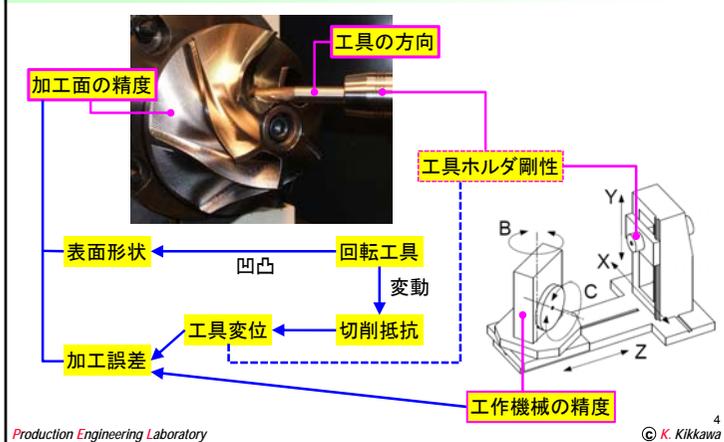


3

Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

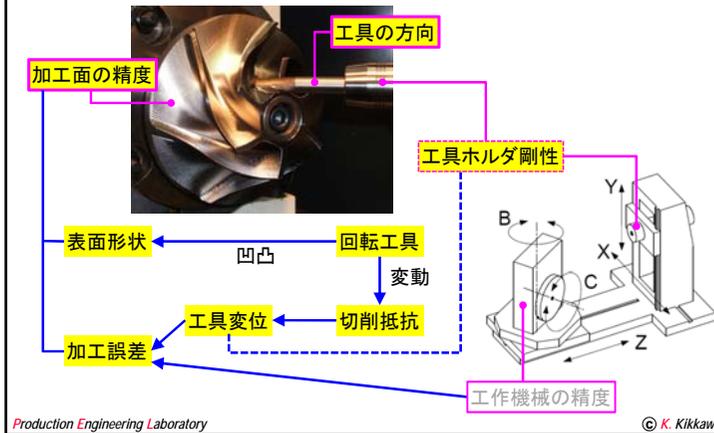
研究課題



Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa 4

研究課題：その1

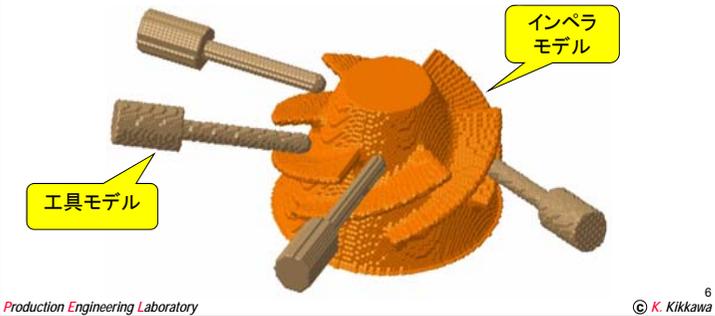


Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

工具姿勢の自動決定

- ◆ 人間が決めるのは面倒／時間がかかる。
- ◆ 工具姿勢の自動決定：組み合わせ最適化問題とみなす。

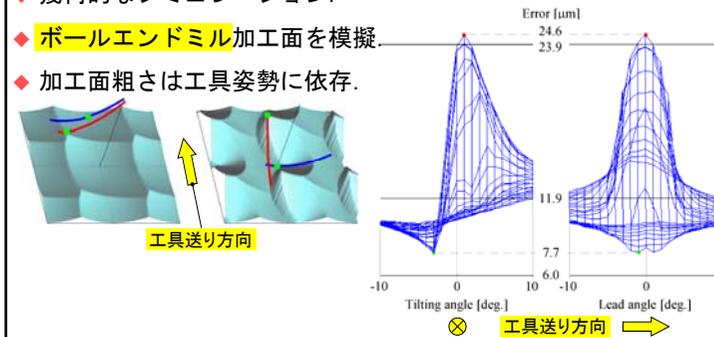


Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

加工面の幾何シミュレーション

- ◆ 幾何的なシミュレーション。
- ◆ ボールエンドミル加工面を模擬。
- ◆ 加工面粗さは工具姿勢に依存。

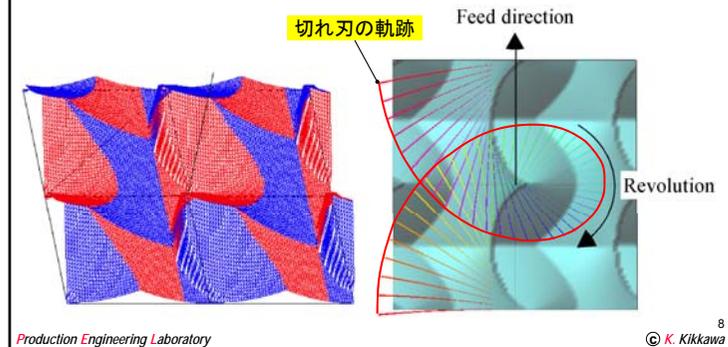


Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

エンドミル切れ刃の軌跡

- ◆ 進行方向右側の停留点→すり鉢の底になる。
 - 左右は工具の回転方向による。

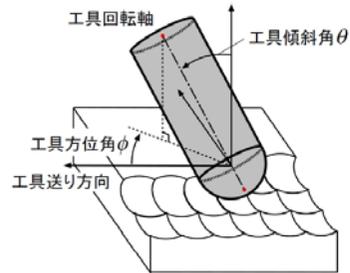


Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

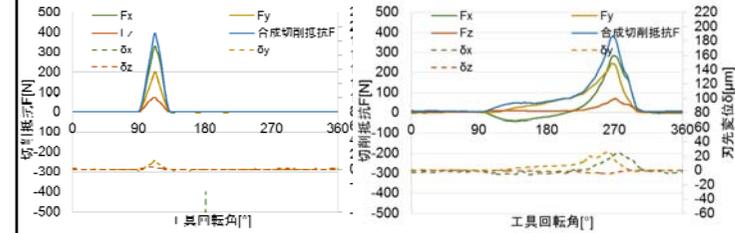
切削抵抗の実測

- ◆ 工具姿勢：傾斜角 θ と方位角 ϕ で定義する。



切削過程の工具姿勢依存性

- ◆ 切削抵抗波形は工具姿勢に依存する。
 - θ : 傾斜角, ϕ : 方位角
- ◆ 加工誤差も工具姿勢に依存する。

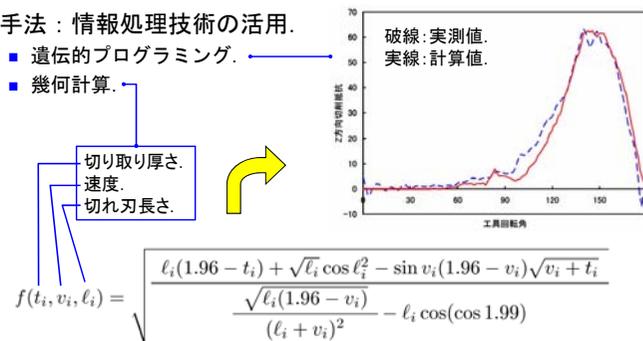


$\theta = 10^\circ$, $\phi = 80^\circ$

$\theta = 10^\circ$, $\phi = 270^\circ$

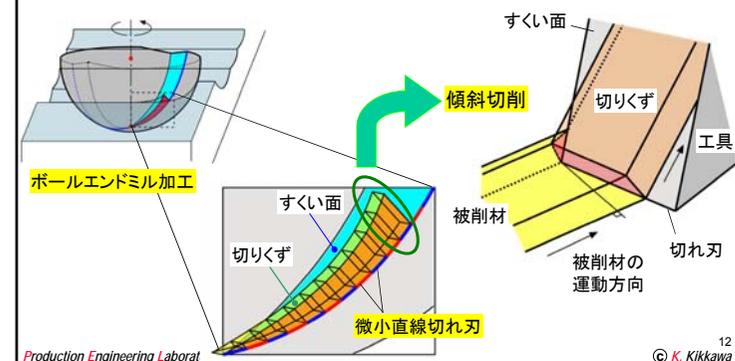
ボールエンドミル加工の切削抵抗予測

- ◆ 目標：近似解を求める簡易的な手法の開発。
- ◆ 手法：情報処理技術の活用。
 - 遺伝的プログラミング。
 - 幾何計算。



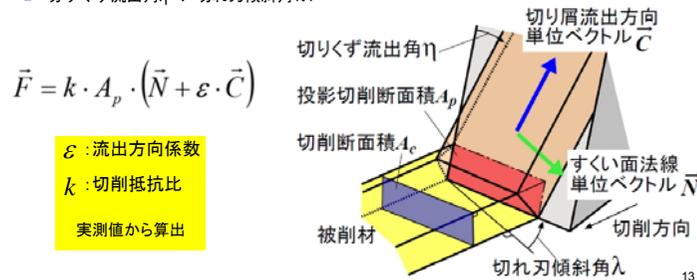
幾何計算に基づく切削抵抗算出法

- ◆ ボールエンドミル加工 $\equiv \sum$ 微小直線切れ刃の傾斜切削。



切削抵抗算出式

- ◆ 切削抵抗の大きさ \propto 投影切削断面積.
- ◆ 力の方向：切りくず流出方向 + すくい面法線.
- ◆ 切りくず流出方向：Stablerの経験則.
 - 切りくず流出角 η = 切れ刃傾斜角 λ .

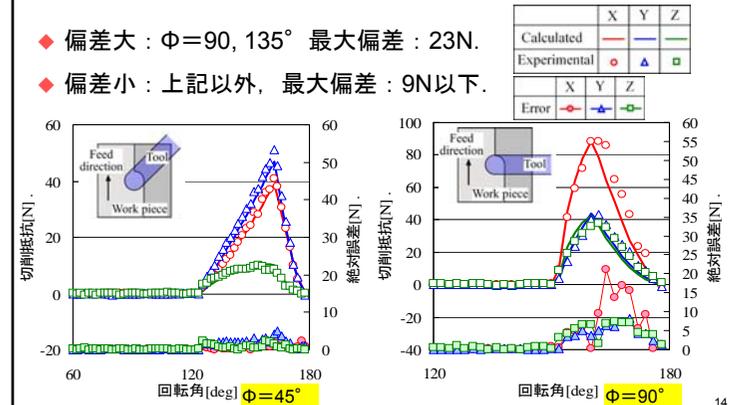


Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

切削抵抗実測値との比較

- ◆ 偏差大： $\Phi=90, 135^\circ$ 最大偏差：23N.
- ◆ 偏差小：上記以外，最大偏差：9N以下.



Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

切削抵抗・工具変位・回転角の同期測定

- ◆ 工具回転角：工具シャンク部のスクラッチ検出.
- スクラッチ間は等角速度とみなす.

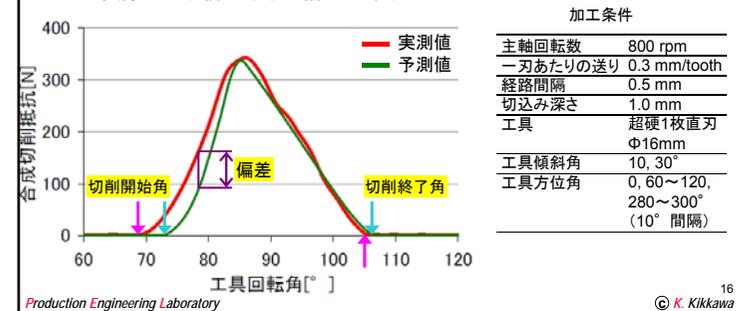


Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

切削開始・終了回転角の偏差

- ◆ 工具回転角に偏差 \rightarrow 切削抵抗の偏差増大.
- ◆ 切削開始・終了点：幾何的に決まるはず.
 - 実際には無視できない偏差がある.



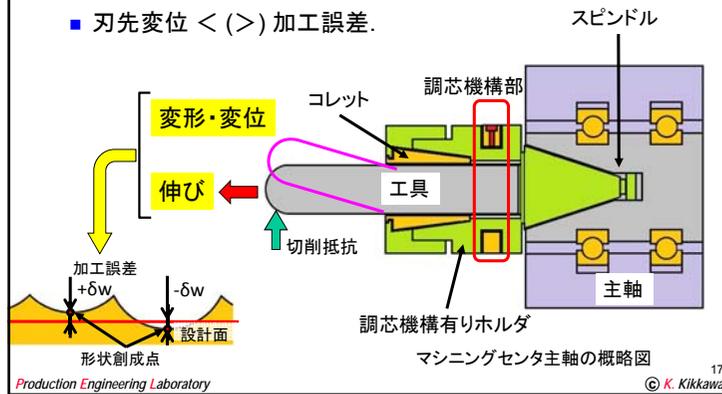
Production Engineering Laboratory

© K. Kikkawa

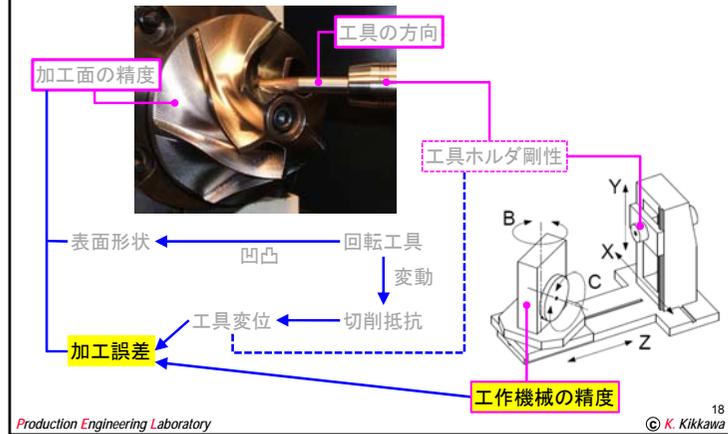
工具把持方法の加工誤差に対する影響

◆ 工具変位と加工誤差が対応しない？

- 刃先変位 < (>) 加工誤差.



研究課題：その2



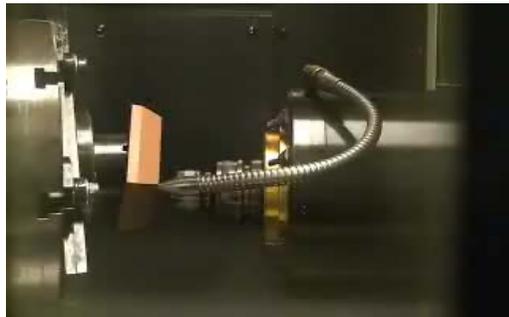
5軸同時制御加工の精度評価

◆ 工作機械の幾何偏差.

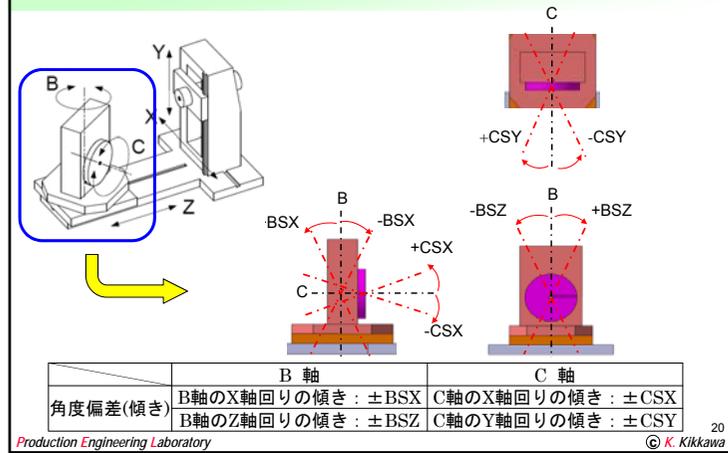
- 加工形状誤差の推測が困難.

◆ 5軸同時制御加工.

- 円錐台加工：NAS979→ISO10791.
- 四角錐台加工：堤(農工大).

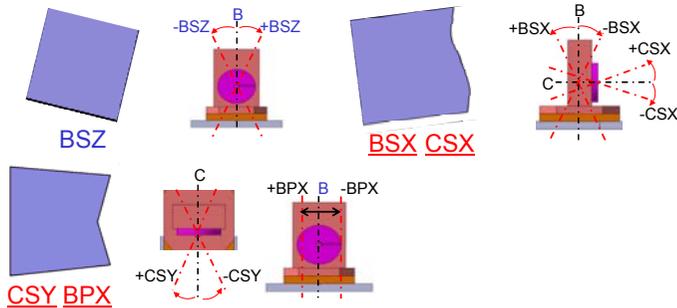


工作機械の角度偏差



個別幾何偏差による形状誤差パターン

- ◆ 5種類の形状誤差パターンに分類
- ◆ 区別できない幾何偏差が存在

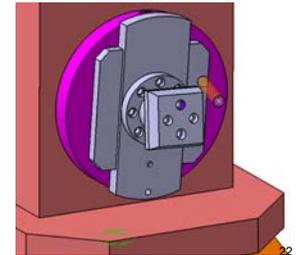
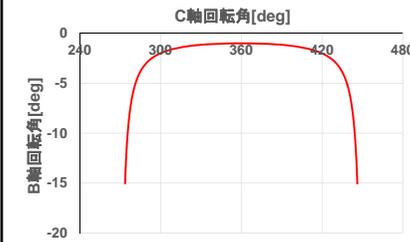
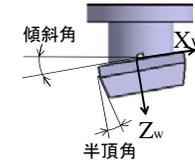


Production Engineering Laboratory

21 © K. Kikkawa

工作機械動作の配置依存性

- ◆ 設置傾斜角 = 半頂角
→ 動作の急変部が現れる。
 - 半頂角15°, 傾斜角14°
 - 工作物から見た工具経路は同じ。
- ◆ 加工時に望ましくない挙動。

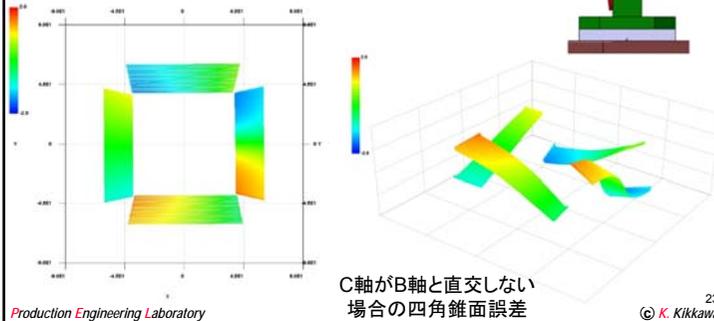


Production Engineering Laboratory

22 © K. Kikkawa

四角錐面形状の特徴分析

- ◆ 「面の歪み」を評価する。
 - 従来は断面の輪郭「線の歪み」を分析。
 - 評価指標を検討中。



Production Engineering Laboratory

23 © K. Kikkawa

工作機械の幾何偏差測定法の開発

- ◆ 四角錐台加工経路で基準形状を測定する。
 - 加工試験：加工誤差は不可避。
 - 幾何偏差と加工誤差の分離が困難。
- ◆ 既存測定機：四角錐台加工の模擬は困難。
 - ダブルボールバー(DBB)：円錐台加工の模擬は可能。
 - R-test：測定範囲が大きいと使い勝手が良い。



<http://www.renishaw.jp/jp/qc20-w-ballbar-system-11075>



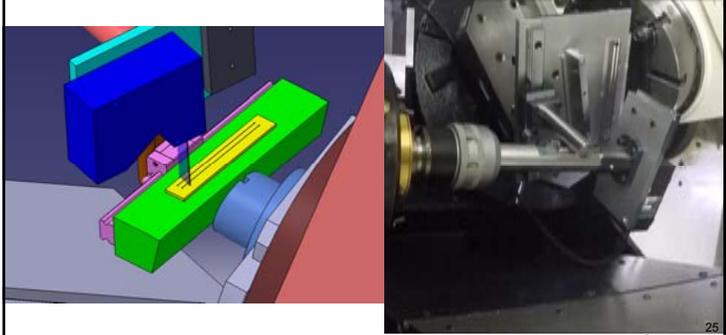
<http://www.ibspe.com/category/rotary-analyzer.htm>

Production Engineering Laboratory

24 © K. Kikkawa

2次元変位測定器による平面測定

- ◆ 2次元変位測定器：測定線上の変位を測定する。
- ◆ 測定線＝エンドミル創成線とみなす。



Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa 25

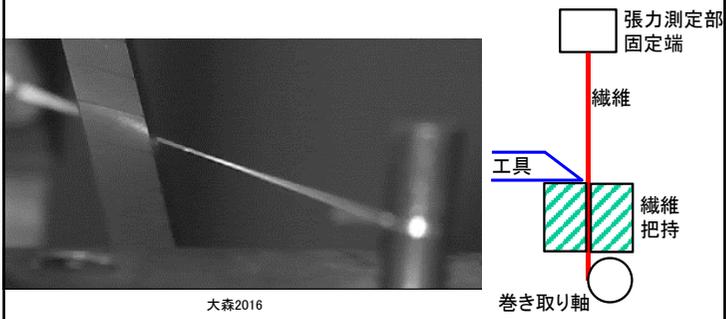
研究分野



Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa 26

高強度ポリエチレン繊維の切断特性

- ◆ FRP(Fiber Reinforced Plastics)のエンドミル加工。
- ◆ 強化繊維の切断条件を検討する。



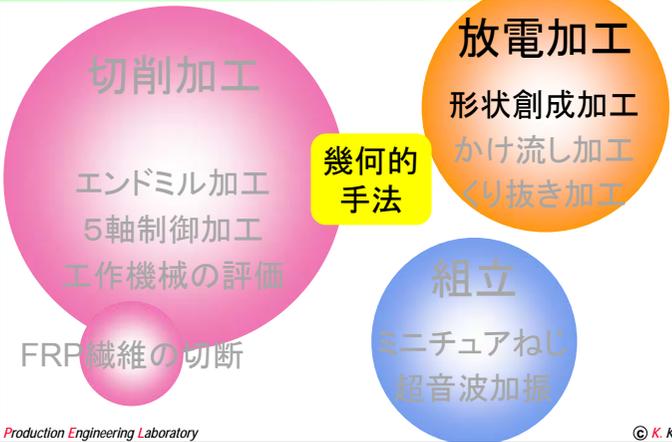
大森2016
Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa 27

研究分野



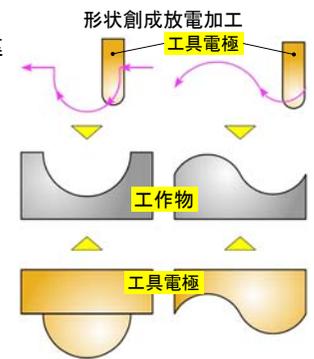
Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa 28

研究課題：その3



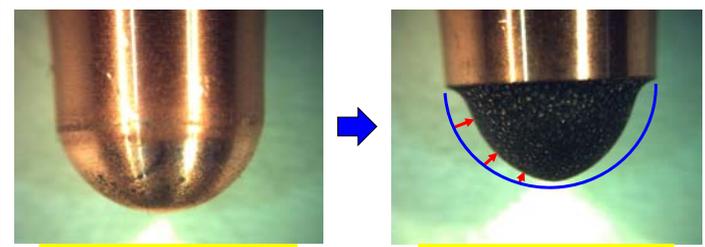
形状創成放電加工

- ◆特徴
 - 加工形状の違い=加工経路の違い.
 - 工具電極の形状は規格化可能.
 - 電極消耗を把握しやすい.
- ◆加工コストの低減
 - 工具電極の準備コストの低減.



先端半球電極の部位別消耗率の実測

- ◆電極消耗率 = 電極消耗速度 / 加工速度 (体積速度).
- ◆部位別消耗率：電極表面位置ごとに消耗率を求める.
 - 電極部位：回転軸垂直面でスライスした円盤側面.

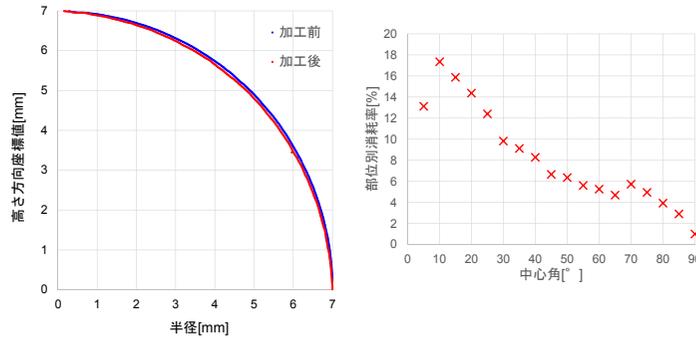


傾斜面直線経路加工時の消耗率測定

- ◆傾斜面を等高線方向に溝加工する.
- ◆加工前後の形状測定⇒体積差分を求める.
 - 工具電極：電極消耗量.
 - 工作物：加工量.
 - 消耗率 = 体積比.



電極消耗率：実測値の例

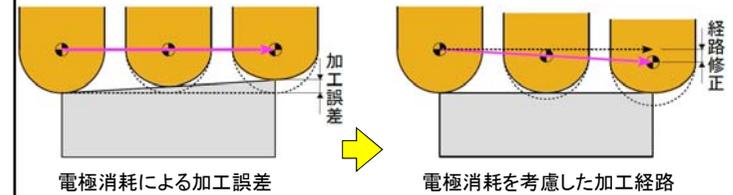


Production Engineering Laboratory

33 © K. Kikkawa

形状創成放電加工の高精度化

- ◆ 工具電極の消耗を予測・考慮した経路で加工。
 - 工具電極の消耗は不可避。
 - 消耗した工具電極用の経路を算出する。



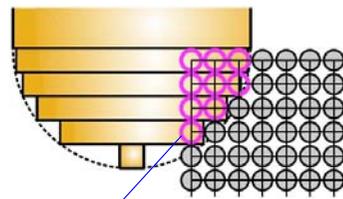
Production Engineering Laboratory

34 © K. Kikkawa

除去体積と消耗形状の算出法

◆ 除去体積

- 円板ごとに求める。
- 円板とボクセルの重なりを検出。
- 除去体積 = ボクセル数 × ボクセル単位体積。



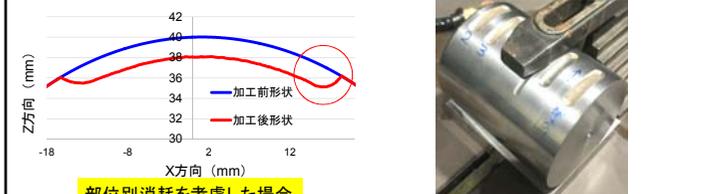
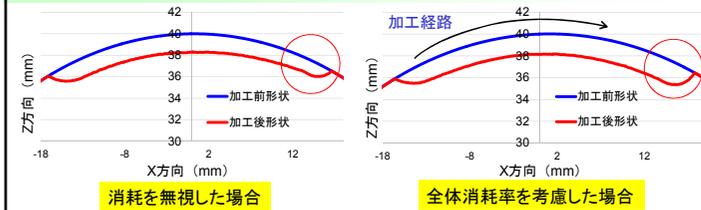
◆ 消耗形状

- 消耗体積を円板ごとに求める。
- 消耗体積に相当する円板半径を求める。

Production Engineering Laboratory

35 © K. Kikkawa

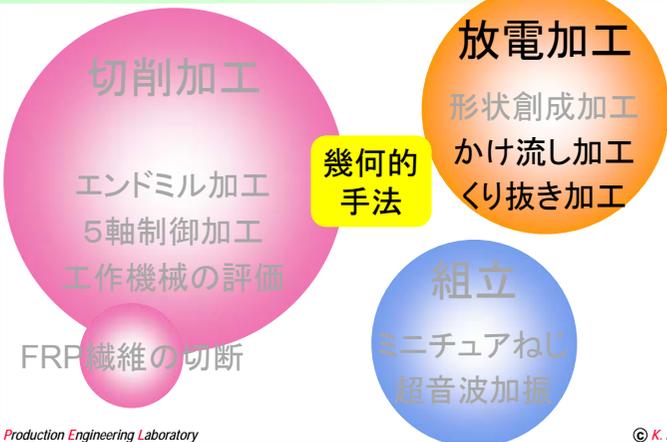
電極消耗考慮の効果



Production Engineering Laboratory

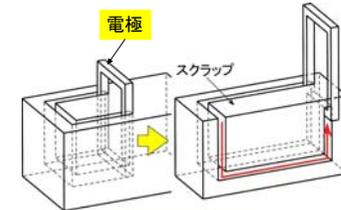
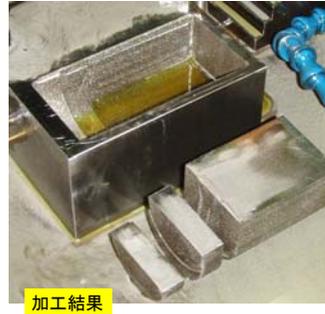
36 © K. Kikkawa

研究課題：その4



くり抜き放電加工

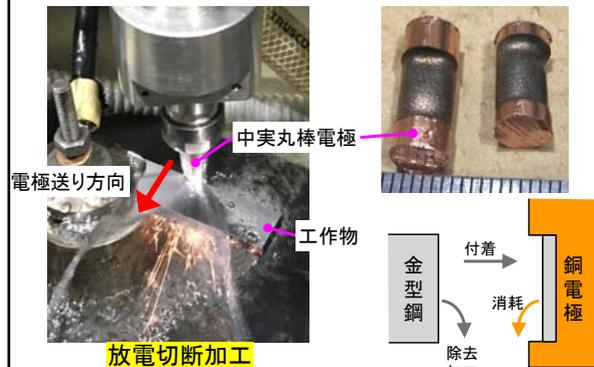
- ◆ 除去領域の輪郭のみ加工する。



Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa 38

くり抜き放電加工の高速化

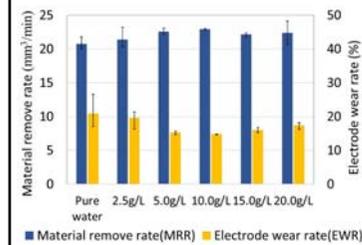
- ◆ 不燃性加工液掛け流し加工。



Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa 39

微粒子添加加工液の効果

- ◆ ZrB₂微粒子を純水に添加。
 - 粒径：3μm.
- ◆ 加工速度と電極消耗率に効果あり。
 - 加工速度：増加。
 - 電極消耗率：減少。



Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa 40

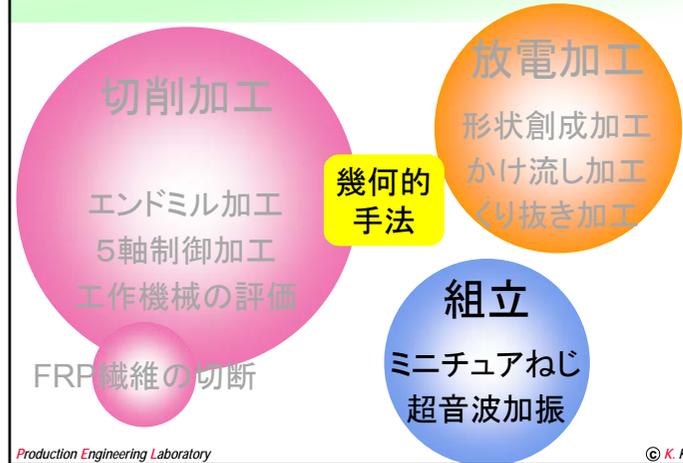
電極間の拡大観察

- ◆ 加工屑の挙動を観察する.
 - 電極消耗と工作物付着が両立する現象解明.
- ◆ 放電クレータの内部は見えない.



Production Engineering Laboratory 500fps, 50μsで撮影 © K. Kikkawa

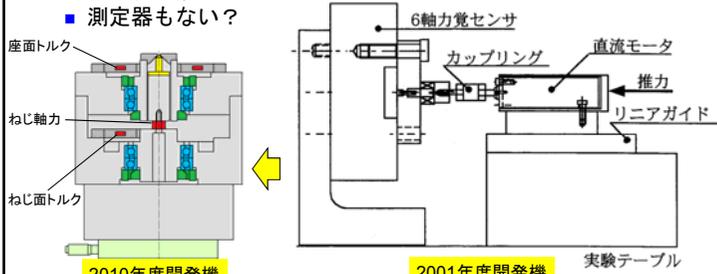
研究課題：その5



Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa

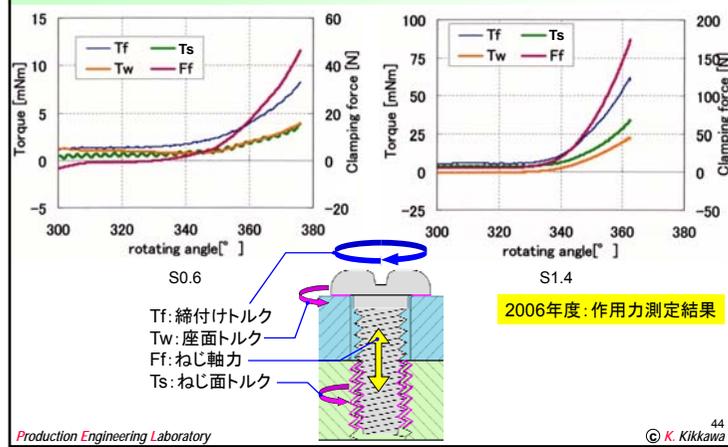
当初目標：ねじ締めマイクロマシン

- ◆ 組立+マイクロマシン.
- ◆ 必要な締付けトルクは？
 - 締付け対象：ミニチュアねじ (JIS B0201 : S0.3~S1.2)
 - データが無い.
 - 測定器もない？



2010年度開発機 2001年度開発機 実験テーブル © K. Kikkawa

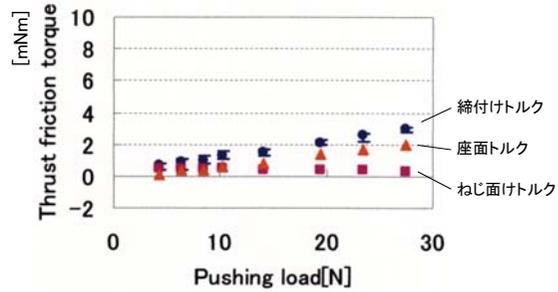
作用力の測定結果



Production Engineering Laboratory © K. Kikkawa

押し付け力の効果

- ◆ 押し付け力：大 → 座面トルク：大.
- ◆ 呼び径：小 → 相対的に押し付け力の効果：大.

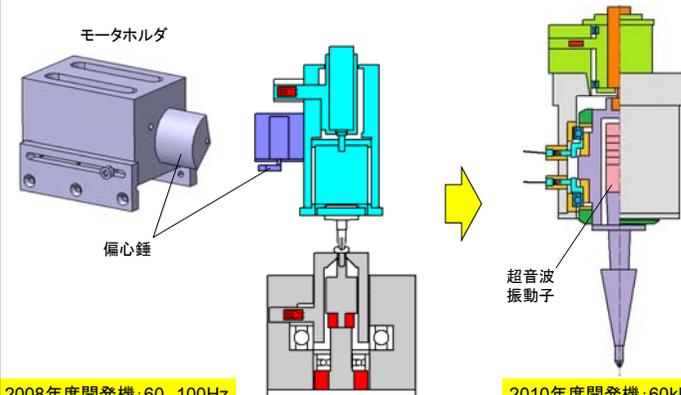


押し付け力に対する摩擦トルク (S0.6)

Production Engineering Laboratory

45
© K. Kikkawa

締付け過程における加振の効果



2008年度開発機: 60, 100Hz

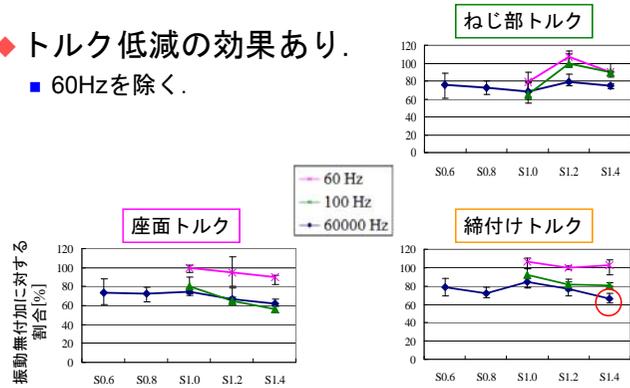
2010年度開発機: 60kHz

Production Engineering Laboratory

46
© K. Kikkawa

加振式ねじ締め結果

- ◆ トルク低減の効果あり.
- 60Hzを除く.



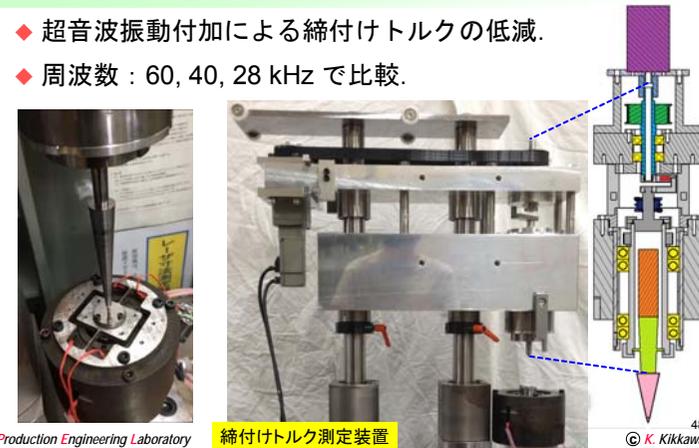
2010年度の成果

Production Engineering Laboratory

47
© K. Kikkawa

超音波加振式ねじ締め法

- ◆ 超音波振動付加による締付けトルクの低減.
- ◆ 周波数：60, 40, 28 kHz で比較.



締付けトルク測定装置

Production Engineering Laboratory

48
© K. Kikkawa