

平成 22～24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「マイクロ超音波・電解ハイブリッド内面加工装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 東北経済産業局  
委託先 ミクロン精密株式会社

# 目次

<b>第1章 研究開発の概要</b>	1
1-1 研究開発の背景	1
1-2 研究開発の目的	2
1-3 研究開発目標	3
1-4 研究体制	4
(研究組織・管理体制、研究員・管理者氏名、アドバイザー氏名)	
1-5 成果概要	7
1-6 当該研究開発の連絡窓口	8
<b>第2章 本論</b>	
2-1 超音波振動を援用した内面研削加工の確立	9
2-1-1 超音波振動加工理論に基づく加工条件の最適化と 超音波スピンドルの最適仕様の構築	9
【理論解析手法 -統計的手法による振動研削の理論解析-】	9
【実験による検証】	13
【振動重畳研削による検討 -微細構造創成-】	15
【まとめ】	17
2-1-2 超音波振動加工理論に基づくマイクロ工具設計と機能性表面の創成実験	18
【3D 超音波援用加工機の開発と振動の観察】	18
【通常砥石による微細形状創成実験】	22
【単粒ダイヤモンド砥石による微細形状創成実験】	24
【まとめ】	28
2-1-3 内面研削用超音波スピンドルの試作	29
【超音波援用研削の基礎実験】	29
【開発コンセプトと性能評価】	32
2-1-4 超音波援用効果の最大化とその検証	36
【まとめ】	37
2-2 超音波電解ハイブリッド内面研削盤の開発	38
2-2-1 電解研削用電源の試作とその性能評価	38
【電解研削への超音波援用効果】	38
【電解作用の応答性と安定性の向上】	40
【アスペクト比 10 の内周面の加工】	43

【超音波振動と電解作用の相乗効果のメカニズム】	45
【ルミノール化学発光による観察】	47
【相乗効果のメカニズムのまとめ】	49
2-2-2 クーラントスルー型超音波電解スピンドルの開発とその性能評価	50
【研削実験と成果】	51
【まとめ】	52
<b>第3章 全体総括</b>	53
謝辞	54
参考文献	54

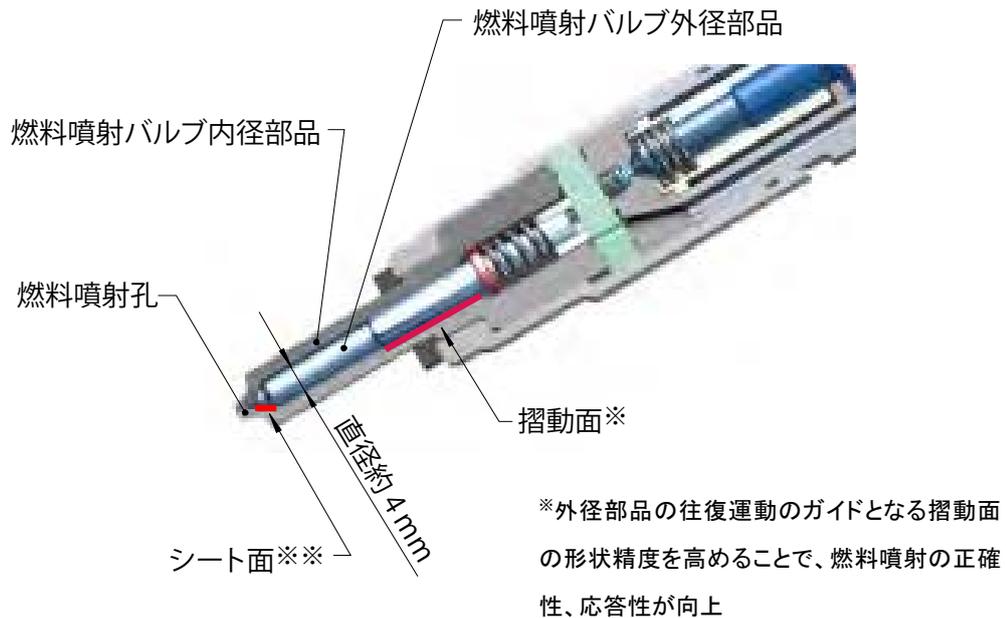
# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景

内周面加工は、様々な製品の部品製造工程で行われている。

近年、製品の小型・軽量化、高機能・高性能化、そして低価格・短納期化のニーズが拡大し、小型化した構成部品に対する高能率・高精度加工技術の重要性が増している。内周面加工の場合、外周面加工とは異なり、工作物内周面の小径化には、砥石の小径化により対応しなくてはならない。そして、砥石の小径化は、砥石周速や砥石軸剛性の低下をもたらすことから、内周面加工の精度や能率は加工する径に大きく依存している。

外径部品と内径部品の組み合わせで構成する嵌合部品の量産ラインを例にとると、その部品サイズが小さくなるほど、内周面加工の工程がボトルネックとなりやすい。また、嵌合部品は、外周面と内周面の両方の形状精度が適合することでその性能が決定する。例えば、高い形状精度を必要とする自動車エンジンの燃料噴射バルブ(図 1.1.1)においては、高い加工能率を維持して、いかに内径部品の形状精度を外径部品の形状精度に近づけられるかで、燃料噴射バルブの性能、結果的には、内燃機関の燃焼効率を決定する。



※※外径部品と内径部品の両円錐面の形状精度を高めることで、バルブの油密性が向上。高圧燃料噴射を必要とする次世代型ディーゼルエンジンの高性能化に重要な要素。

図 1.1.1 燃料噴射バルブ

## 1-2 研究開発の目的

研削加工のメカニズムは、砥粒の接触により工作物を弾性変形させ、さらに砥粒に力が加わり、弾性変形した部分を塑性変形に変える。その後、砥粒と一緒に塑性変形した部分を移動させ、工作物表面から引き離し切屑として除去する。この一連の動きは、砥粒の運動エネルギーと工作物に塑性変形させる力を伝える砥石軸の剛性により成立する。次に、内周面研削を平面研削、外周面研削と比較すると、内周面研削は工作物に対する砥粒の切り込み角が他の2つの加工よりも浅くなることで砥粒が工作物表面で上滑りしやすくなり、研削加工を成立させるために、砥粒により高い負荷を与える必要がある。したがって、従来の内周面研削では、加工可能な内周面のアスペクト比の限界があり、これまではその限界に近づけるため砥石軸の材料強度を高めたり、砥石スピンドルの回転速度を上昇させて対応してきた。

現在、量産機として使用する内面研削盤で使用している砥石スピンドルの回転速度は  $100,000 \text{ min}^{-1}$  を超え、 $150,000 \text{ min}^{-1}$  での加工も一般化しているが、この回転速度においても加工が困難な部品は多い。さらにこれ以上の砥石スピンドルの高速化は、そのベアリング寿命の短縮によるメンテナンスコストの増加、さらに砥石軸の振れ回りによる加工精度の劣化、そして砥石破損など、新たな問題を引き起こす。

そこで、図 1.2.1 に示す内面研削用超音波スピンドルユニットの開発を行い、従来研削に超音波振動を援用することで、従来研削以上の高能率・高精度加工を目指した。そして、さらに超音波援用研削を発展させ、超音波振動の援用と同時に電解作用の援用も可能とした超音波電解ハイブリッド内面研削盤の開発を行い、従来研削では加工不可能な高アスペクト比内面研削の高能率・高精度加工を目指した。

加えて、これまでは内面研削の加工能率や加工精度の追究に留まっていたが、超音波援用研削により加工表面の微細なパターンを形成することから、超音波振動による砥粒の運動を理論解析を行いながら、機能性表面の創成を試み、油膜によって高い摺動性持つ表面や、油密性の高い表面の創成をめざした。

スピンドル2:クーラントスルー型超音波スピンドル

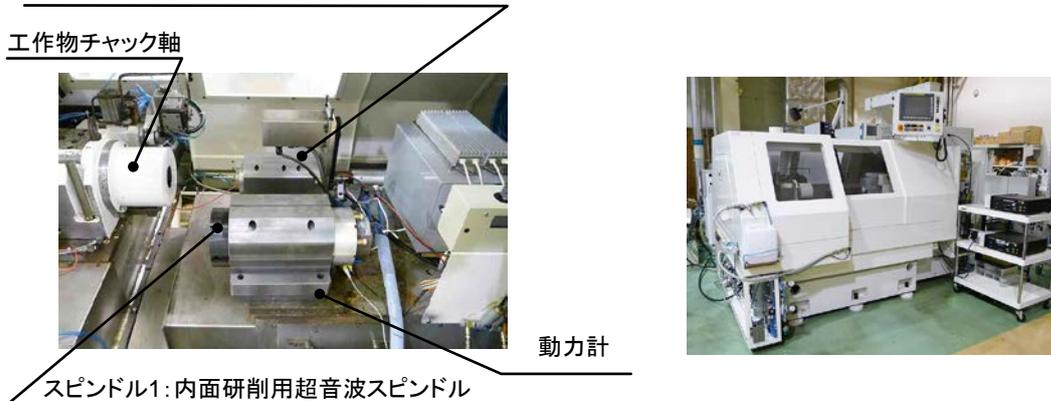


図 1.2.1 内面研削用超音波スピンドルユニット

図 1.2.2 超音波電解ハイブリッド内面研削盤

### 1-3 研究開発目標

#### 【1】超音波振動を援用した内面研削加工の確立

【1-1】超音波振動加工理論に基づく加工条件の最適化と超音波スピンドルの最適仕様の構築。

砥粒の超音波振動の理論解析により加工精度の向上を目指す。

加工精度の向上、加工能率の向上をもたらす砥石の仕様、伝搬させる超音波振動の条件を理論解析し、超音波スピンドルを内面研削に適した仕様を導く。

【1-2】超音波振動加工理論に基づくマイクロ工具設計と機能性表面の創成実験

軸振動1軸+たわみ振動2軸の超音波振動を発生する 3D 超音波援用加工機を開発し、超音波振動、加工速度をパラメータとし砥粒運動のシミュレーション解析を行い、砥粒の運動を高速カメラにより検証しながら、切削痕を重畳させ機能性表面を創成する。

【1-3】内面研削用超音波スピンドルの試作

周波数 40 kHz、振幅 10  $\mu\text{m}_{p-p}$  の超音波振動を砥石に伝搬可能とし、さらに最高回転速度 50000  $\text{min}^{-1}$  での稼働、ラジアル剛性の強化、および砥石交換作業の簡素化や、メンテナンス性を向上させ、量産ラインへの適応を図る。

【1-4】超音波援用効果の最大化とその検証

超音波援用効果が最大となる研削条件を検証し、加工効率が最大となる加工サイクルを構築する。

#### 【2】超音波電解ハイブリッド内面研削盤の開発

【2-1】電解研削専用電源の試作とその性能評価

粒度#2000の砥石を使用し、電極間距離 0.005 mm 以下の条件下で高い応答性と安定した電解反応を可能とする電源装置を製作する。

【2-2】クーラントスルー型超音波スピンドルの開発とその性能評価

深さ 30 mm の止まり穴円錐面の超音波電解研削を可能とする。

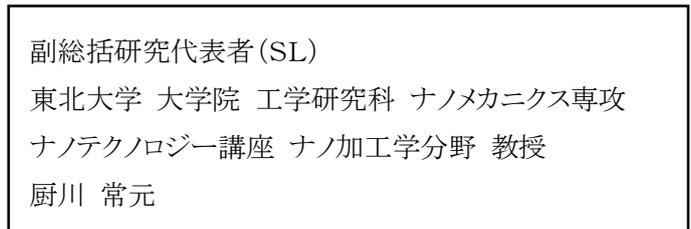
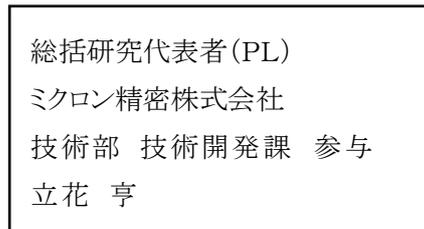
## 1-4 研究体制

### 1-4-1 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織(全体)

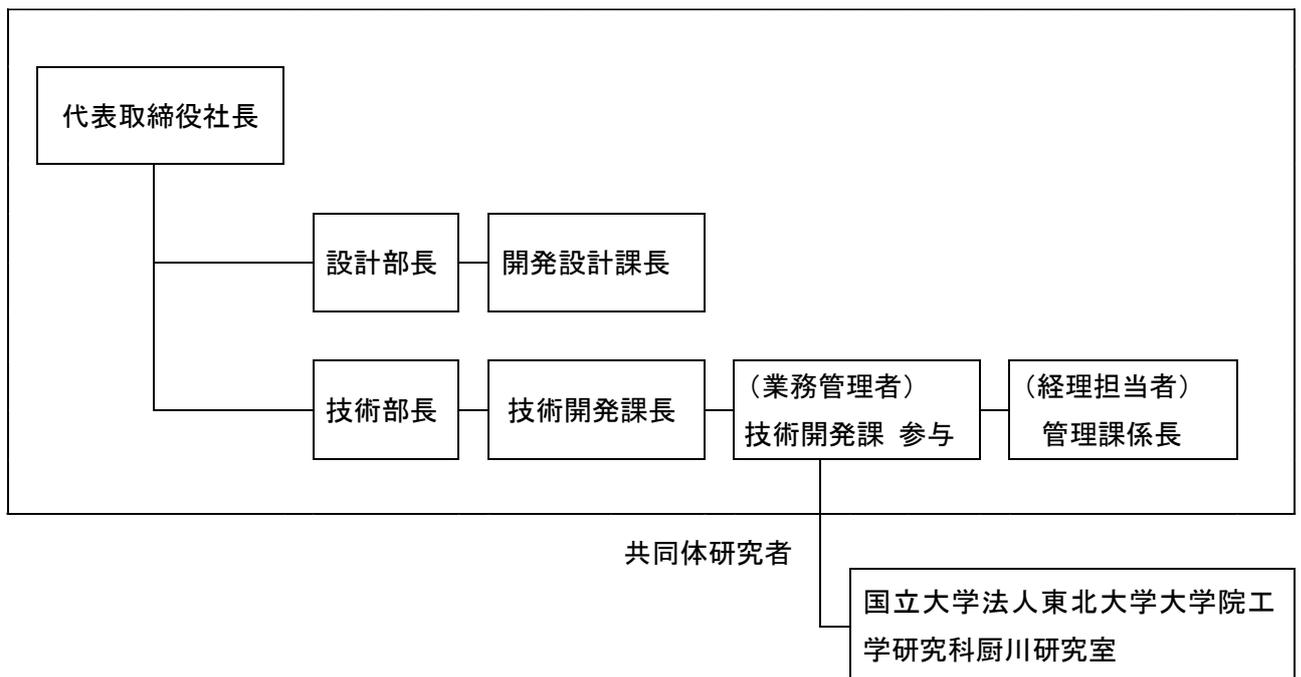


※共同研究に関する覚書を締結。再委託契約は行わない。



#### 2) 管理体制

事業管理者[ミクロン精密株式会社]



### 1-4-2 研究員及び管理員

【事業管理機関】ミクロン精密株式会社

#### 1) 研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
----	-------	----------

立花 亨	技術部 技術開発課 参与	①、②、④、⑤、PL
小林 敏	技術部 技術開発課 課長	①、②、④、⑤
高橋 征幸	設計部 開発設計課 課長	①、②、④、⑤
村越 親	設計部 開発設計課員	①、②、④、⑤
武田 勝幸	設計部 制御課 課長	①、②
蛭名 悟志	技術部 技術課 係長	①、②
鈴木 広樹	設計部 設計課員	①、②
柴田 徹	設計部 制御課員	①、②
小池 一徳	設計部 開発設計課員	①、②、④、⑤

## 2) 管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
立花 亨(再)	技術部 技術開発課 参与	①、②、④、⑤、PL
荒井 寿洋	管理部 管理課 係長	⑤
米野 裕幸	管理部 管理課員	⑤
秋葉 雅彦	調達部 調達課 係長	⑤

## 【共同体(研究員)】

### 国立大学法人東北大学大学院工学研究科厨川研究室

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
厨川 常元	大学院工学研究科 機械システムデザイン工学 専攻 知的デザイン学講座 ナノ精度加工学分野 教授	③-1、SL
水谷 正義	大学院工学研究科 機械システムデザイン工学 専攻 知的デザイン学講座 ナノ精度加工学分野 准教授	③-1 ③-1
嶋田 慶太	大学院工学研究科 機械システムデザイン工学 専攻 知的デザイン学講座 ナノ精度加工学分野 助教	

実施内容欄の番号は次の開発項目を示す。

- ①: 高速対応型超音波スピンドルの試作と超音波振動研削方法を追求
- ②: 超音波・電解スピンドルユニットを試作し、電解研削方法を追求
- ③: 国立大学法人東北大学大学院工学研究科での研究
- ④: 事業化に関する研究
- ⑤: 研究全体の統括、プロジェクトの管理運営

1-4-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理機関】

ミクロン精密株式会社

(経理担当者) 管理部 管理課 課長	山口 洋子
管理部 管理課 係長	荒井 寿洋
管理部 経理課員	米野 裕幸
(業務管理者) 技術部 技術開発課 参与	立花 亨
技術部 技術開発課 課長	小林 敏

1-4-4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

1) 研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
立花 亨	ミクロン精密株式会社 技術部 技術開発課 参与	PL <input type="checkbox"/>
厨川 常元	国立大学法人東北大学大学院工学研究科 教授	SL
小林 敏	ミクロン精密株式会社 技術部 技術開発課 課長	<input type="checkbox"/>
高橋 征幸	ミクロン精密株式会社 設計部 開発設計課 課長	<input type="checkbox"/>
村越 親	ミクロン精密株式会社 設計部 開発設計課員	<input type="checkbox"/>
小池 一徳	ミクロン精密株式会社 設計部 開発設計課員	<input type="checkbox"/>
田中 善衛	山形県工業技術センター 副所長	アドバイザー
高井 作	株式会社マイスター 代表取締役社長	アドバイザー
戎 章夫	株式会社マイスター 技術顧問	アドバイザー
今野 高志	ジャスト株式会社 常務取締役	アドバイザー

2) アドバイザー

氏名	主な指導・協力事項
田中 善衛	精密加工技術、精密測定技術
高井 作	精密加工技術、超音波加工技術
戎 章夫	精密加工技術、超音波加工技術、電解加工技術
今野 高志	電着工具、小径ダイヤモンド工具の開発

## 1-5 成果概要

テーマ	目標達成度	目標(内容)	研究結果
【1-1】超音波振動加工理論に基づく加工条件の最適化と超音波スピンドルの最適仕様の構築	100%	○加工品質に評価理論の構築 ○内面研削用超音波スピンドルの仕様決定	完了
	100%		完了
【1-2】超音波振動加工理論に基づくマイクロ工具設計と機能性表面の創成実験	100%	○実験装置と評価法の確立 ○振動条件と加工表面微細構造の規則性の解明	完了
	100%		完了
【1-3】内面研削用超音波スピンドルの試作	80%	○量産ラインへ実用化 ○加工能率と加工精度の評価	継続
	90%		継続
【1-4】超音波援用効果の最大化とその検証	100%	○加工システムの構築 ○多面的な総合評価	完了
	80%		継続
【2-1】電解研削専用電源の試作とその性能評価	100%	○加工システムの構築 ○適応制御の構築	完了
	80%		継続
【2-2】クーラントスルー型超音波スピンドルの開発とその性能評価	100%	○加工システムの構築 ○加工能率と加工精度の評価	完了
	80%		継続

## 1-6 当該研究開発の連絡窓口

本プロジェクトに関連した問い合わせに対応する窓口は次の通り

### 1) プロジェクト全体の運営に関する事項

ミクロン精密株式会社 技術部 技術開発課 参与  
立花 亨  
メール: t-tachi@micron-grinder.co.jp  
TEL: 023-688-8111  
FAX: 023-688-7476

### 2) プロジェクト全体の装置に関する事項

ミクロン精密株式会社 技術部 技術開発課 課長  
小林 敏  
メール: toshi@micron-grinder.co.jp  
TEL: 023-688-8111  
FAX: 023-688-7476

### 3) 超音波援用研削理論に関する事項(共同研究)

国立大学法人東北大学 大学院工学研究科 教授  
厨川 常元  
メール: tkuri@m.tohoku.ac.jp  
TEL: 022-795-6948  
FAX: 022-795-7027

## 第2章 本論

### 2-1 超音波振動を援用した内面研削加工の確立

#### 2-1-1 超音波振動加工理論に基づく加工条件の最適化と超音波スピンドルの最適仕様の構築

これまでの超音波援用加工は、超音波振動を工具に伝搬させ、その先端を工作物に対して叩きの運動により加工をアシストする方法が主流であり、多くの実用例が報告されている<sup>1), 2)</sup>。それに対し、超音波振動を伝搬させた砥石外周面の砥粒を工作物に対して擦りの運動で研削加工をアシストする方法での実用例は少ない<sup>3), 4)</sup>。本研究では後者の方法を用いた超音波振動援用内周面研削である。

この方式の特徴は、加工表面が正弦波状の切削痕で形成され、単純な切削痕で形成される従来研削での加工表面とはテクスチャーが異なることである。従来研削では、砥石の回転速度、砥粒サイズ、またその突出し高さが加工能率、加工精度に影響を与えるパラメータであったが、超音波援用研削ではそれらに加えて、超音波振動の条件も重要なパラメータとなる。そこで、内面研削に特化した超音波スピンドルの製作を目的に、超音波振動による砥石外周の砥粒の運動と加工表面の理論解析を行ない、加工能率、加工精度における最適仕様を決定した。

#### 【理論解析手法 -統計的手法による振動研削の理論解析-】

図 2.1.1 に解析モデルの概略図を示す。同図に示すように砥石と工作物にそれぞれ座標  $\Sigma_w$  と  $\Sigma_s$  を定義し、砥粒切れ刃の先端と切削痕の先端座標を決定させ、理論解析を行う。最初に以下のことを仮定する。

- 1) 砥粒切れ刃形状は先端角  $2\alpha$  (一定) の円錐形とする。
- 2) 工作物は砥粒切れ刃の通過した幾何学的形状どおりに切削される。
- 3) 砥粒切れ刃位置は 3 次元的に一様分布で、砥粒切れ刃 1 個の占める平均体積は  $W_0$  である。
- 4) 砥粒切れ刃の摩滅、破碎、脱落は考えない。
- 5) 前加工面は完全な平面とする。

振動研削の研削面粗さの理論解析を行うために、本研究で新たに導入した概念として“有効切削痕候補”がある。砥粒切れ刃の切削位置を示した模式図である図 2.1.2 を用いて有効切削痕候補について説明する。なお同図において記号  $G_{ij}$  は、 $i$  番目の砥粒  $G_i$  が最下点の切削痕を基準に  $j$  番目に創成する切削痕の先端座標を意味し、 $G_{ij}$  はその切削痕全体を表す。

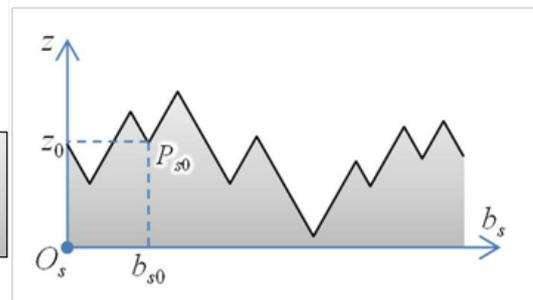
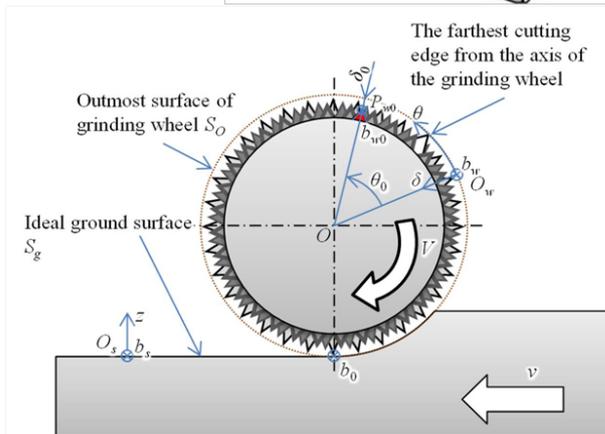
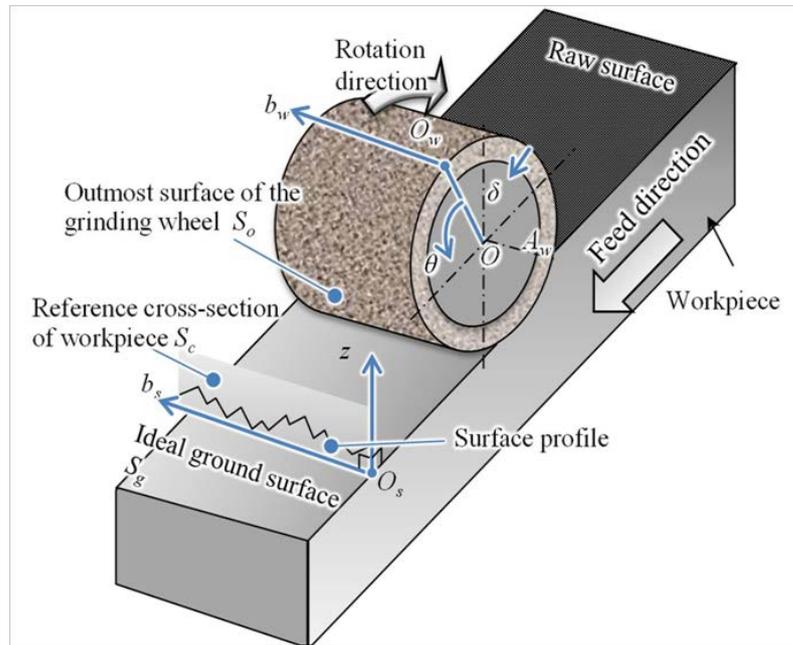
・通常研削においては同一砥粒切れ刃が創成する切削痕は研削断面内において垂直方向に整列するため、最終的基準断面に残存するものは 1 個である。(図 2.1.2 (a))

・振動研削においては砥石が軸方向に相対的に移動するため複数個の切削痕が残存する可能性がある。(図 2.1.2 (b)、この図はスラント研削の例)

このような最終的な仕上げ面に残存する可能性のある切削痕を有効切削痕候補と定義し、数式においては次式で表す。

$$G'_{i,k} \notin T(G'_{i,j}) \quad \text{for } \forall j \in \mathbb{Z}' \text{ except } j = k \quad (2.1)$$

ここで  $T(G'_{ij})$  は  $G'_{ij}$  を頂点とし図において下方に頂角  $2\alpha$  で広がる二等辺三角形型の領域であり、任意の切削痕  $G'_{ij}$  が有効切削痕候補となる条件は、その下部の領域  $T(G'_{ij})$  に  $G$  が創成する他の切削痕の先端座標  $\{G'_{ij} | j \in \mathbb{Z}'\}$  を一切含まないことと同値である。また有効切削痕候補には他の砥粒切れ刃が創成する切削痕との干渉により無効となるものも含まれている。



(b) Coordinate fixed on the grinding wheel  
(Side view of the overview)

(c) Coordinate of cross section  
of ground surface (Seen from  
the side of grinding wheel)

図 2.1.1 Schematic of vibration

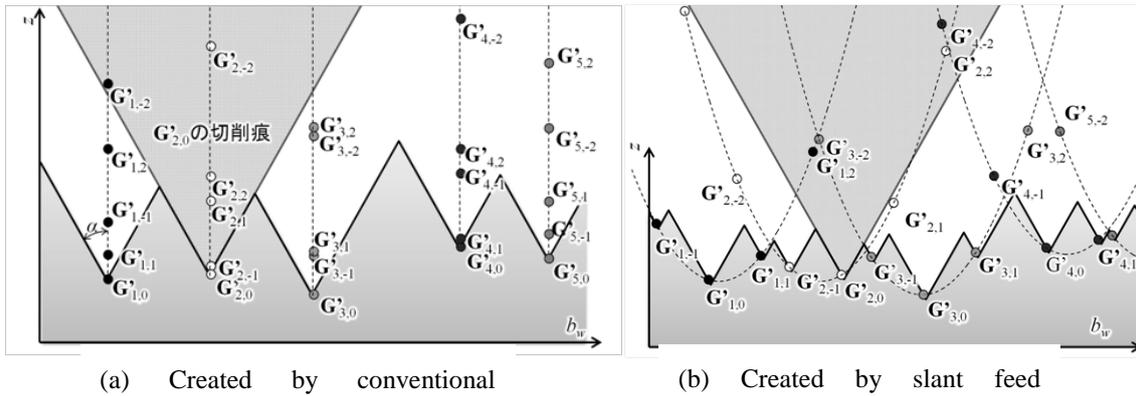


図 2.1.2 Schematics of ground surfaces.

振動研削の研削面粗さの理論解析においては研削断面における有効切削痕候補の密度を計算することにより求めることができる。任意の研削方法における有効切削痕候補の密度  $f_s$  の計算は次式で求めることができる。

$$f_s(\mathbf{X}_s) = \int_{l(\mathbf{X}_s, \theta)} f_w(\mathbf{l}(\mathbf{X}_s, \theta)) E(\mathbf{l}(\mathbf{X}_s, \theta)) d\mathbf{l} \quad (2.2)$$

ここで  $f_w$  は砥石の密度関数、 $\mathbf{l}(\mathbf{X}_s, \theta)$  は研削面内の任意の点  $\mathbf{X}_s$  を通過する砥石内の経路であり、 $E$  は有効切削痕候補のフィルタ関数で式(2.1)を満たす場合に 1、満たさない場合に 0 となる。この密度  $f_s$  から仕上げ面の最大高さ粗さを求めるためには次式の三角形領域に砥粒先端を含まない確率を用いる。

$$\int_0^z 2(z-\zeta) \tan \alpha \cdot f_s(\zeta) d\zeta = \bar{n} \quad (2.3)$$

本式の左辺が三角形領域に砥粒先端を含まない確率を表し、 $f_w$  が一様であるを仮定しているため  $f_s$  は高さ方向のみを変数となっている。  $\zeta$  は積分変数であり  $\exp[-2(z-\zeta) \tan \alpha \cdot f_s(\zeta)]$  は高さ  $\zeta$  に砥粒切れ刃先端が存在しない確率を表す。また式(2.3)の左辺は  $\zeta$  を 0 から  $z$  まで変化させたいずれの高さにも砥粒切れ刃先端が存在しないことを表している。この積算値がランダム係数  $\bar{n}$  を用いて表される確率  $\exp(-\bar{n})$  と等しくなるときの  $z$  が最大高さ粗さ  $R_{\max}$  に等しくなると仮定することで最大高さ粗さを求めることができる。計算結果の一例としてスラント研削の場合を示すと次式となる。

$$R_{\max}(\varphi) = \begin{cases} \left( \frac{15}{8} (R_{\max}^*(\varphi))^2 \sqrt{h(\pi + \varphi)} \right)^{\frac{2}{5}} \\ \equiv \left( \frac{15}{8} (R_{\max}^*(0))^2 \sqrt{h(\pi)} \right)^{\frac{2}{5}} & h(\pi + \varphi) \geq \sqrt{\frac{15}{8}} R_{\max}^*(\varphi) \\ \frac{1}{3} h(\pi + \varphi) + \sqrt{\{R_{\max}^*(\varphi)\}^2 - \frac{4}{45} \{h(\pi + \varphi)\}^2} & h(\pi + \varphi) < \sqrt{\frac{15}{8}} R_{\max}^*(\varphi) \end{cases} \quad (2.4)$$

ここで  $h(\pi)$ 、 $R_{\max}^*(\varphi)$ 、 $\varphi$  は次式で定義される。

$$h(\theta) = \frac{D}{4} \left( \frac{v}{V} \right)^2 \theta^2 \quad (2.5)$$

$$R_{\max}^*(\varphi) = \sqrt{\frac{\bar{n} W_0}{(\pi + \varphi) D} \cot \alpha} \quad (2.6)$$

$$\varphi = \frac{v_a V}{v^2} \cot \alpha \quad (2.7)$$

これらにおいて  $v$  は工作物送り速度、 $V$  は砥石周速、 $D$  は砥石直径、 $W_0$  は砥粒 1 個が砥石内で占める平均体積、 $v_a$  は軸方向への移動速度を示す。

またオシレーション研削に関しては往復を考慮することで数値解析的に求めることができ、オシレーション研削における最適条件は区間として次式で与えられる。

$$n_f = 2.954 \sim 3.871 \times \sqrt{\frac{q}{2}} \quad (2.8)$$

ここで  $n_f$  は砥石回転周波数  $f_r$  とオシレーション周期  $f$  の比  $f_r/f$  であり、 $q$  は振幅半値幅  $A$  と  $\cot \alpha$  の積を  $h(\pi)$  により除した値である。

超音波研削においては図 2.1.3 に示すように超音波振動により砥粒 1 個による研削断面の形状が変化することを考え、下部領域  $T$  を拡大することにより計算することができる。この図 2.1.3 における角度  $\alpha_u$  と高さ  $h_u$  は次式で与えられる。

$$\tan \alpha_u = \frac{n \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}{\sin^{-1} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} \cdot \tan \alpha \quad (2.9)$$

$$h_u = \frac{A}{n} \left( \sin^{-1} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} \right) \cot \alpha \quad (2.10)$$

ここで、 $n$ は超音波振動による最高速度  $2\pi Af$ を周速  $V$ で除した値である。

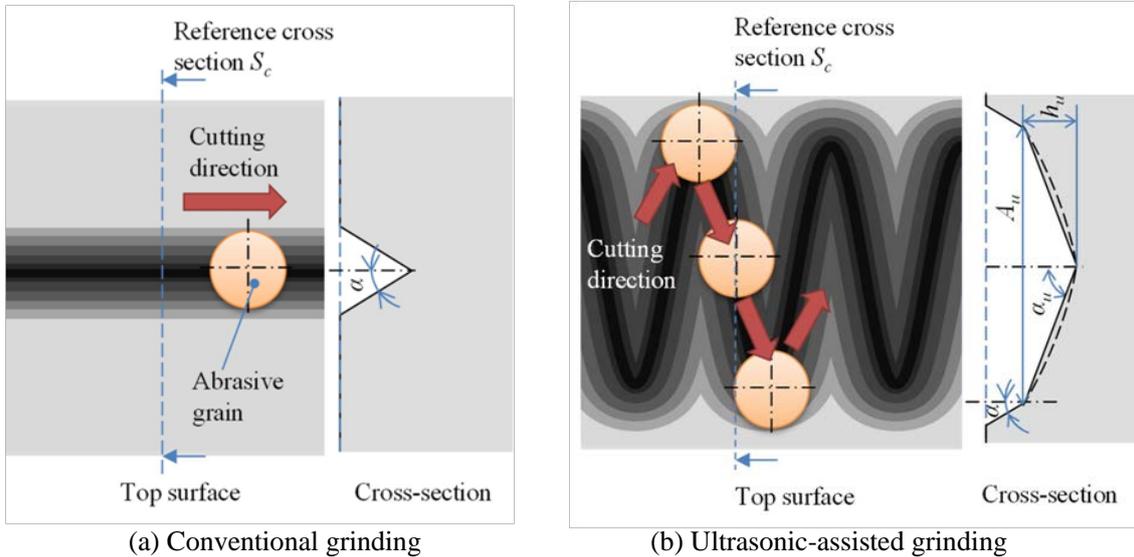


図 2.1.3 Cross sectional shape of conventional grinding and ultrasonic-assisted grinding.

**【実験による検証】**

図 2.1.4 に示す超音波援用マイクロ研削装置により振動研削実験を行った。実験方法の概略を図 2.1.5 に示す。同図に示すように工作物送りを一定に与えた状態で工作物表面を 1 回のみ研削し、その研削面粗さを測定した。また実験の条件を表 2.1.1 に示す。同表においてスラント研削、オシレーション研削および超音波援用研削それぞれにおける条件については数値と併記して表している。

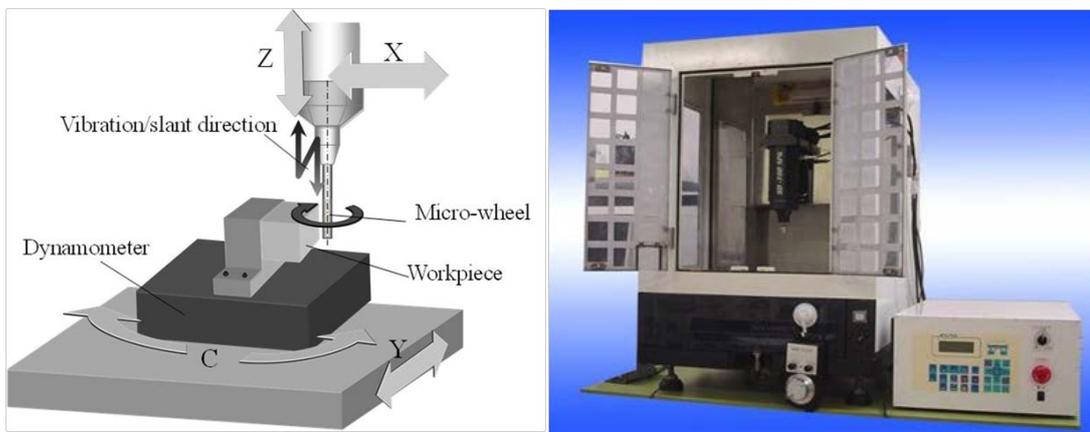


図 2.1.4 Setup of ultrasonic-assisted micro-grinding device

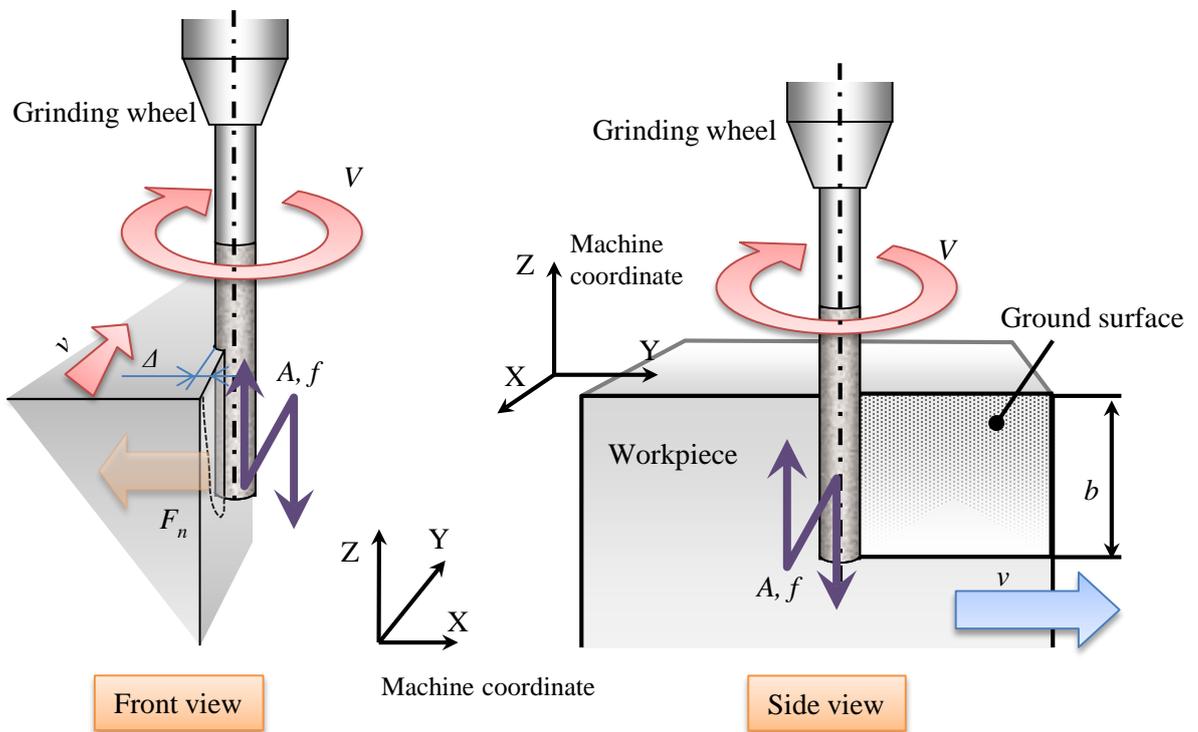


図 2.1.5 Parameters of ultrasonic-assisted grinding

表 2.1.1 Experimental conditions.

Workpiece	Zirconia block 13×14×17 mm <sup>3</sup>
Grinding wheel	Electroplated diamond wheel ( $\phi 1$ )
Grain size (#)	600, 1000, 1500, 3000
Feed speed ( $v$ ) mm/min	0.5 ~ 5
Wheel speed ( $V$ ) mm/s	104.7 (2000 min <sup>-1</sup> )
Wheel depth of cut ( $\Delta$ ) $\mu\text{m}$	50
Feed speed of wheel axial direction ( $v_a$ ) mm/min	0 ~ 6 (Slant feed)
Vibration frequency ( $f$ ) Hz	5.21, 2.08, 1.04, 0.42 (Oscillation grinding) 62×10 <sup>3</sup> (Ultrasonic-assisted grinding)
Vibration amplitude ( $2A$ ) $\mu\text{m}$	16, 40 (Oscillation grinding) 7 (Ultrasonic-assisted grinding)

図 2.1.6～図 2.1.8 にそれぞれの実験結果と理論解析の結果を示す。理論解析においては極限

粗さの値を実験より求め、他の条件に関して表 2.1 の値を用いて計算を行った。同図に示すように、点で示すいずれの実験結果とも曲線で示す計算結果とよく一致している。したがって本解析手法により、実験条件から研削面粗さを求めることが可能となり、以上をもって振動研削に関する理論解析の基礎は完成したといえる。

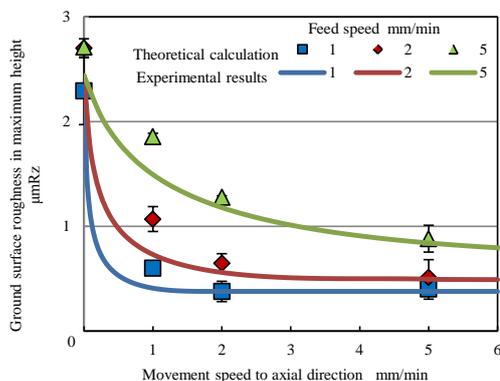
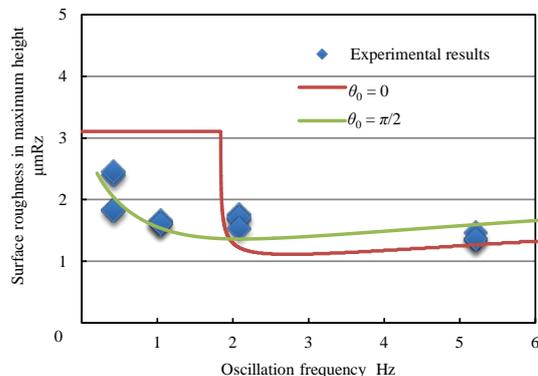
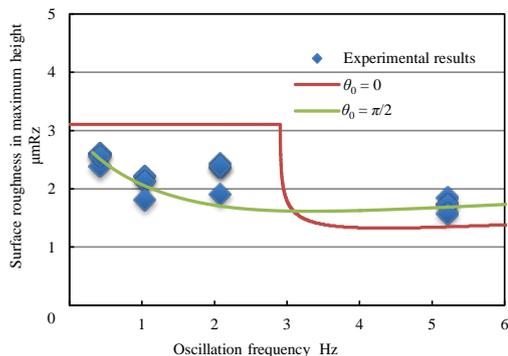


図 2.1.6 Results of slant feed grinding



(a) Oscillation amplitude: 40 μm



(b) Oscillation amplitude: 16 μm

図 2.1.7 Results of Oscillating grinding

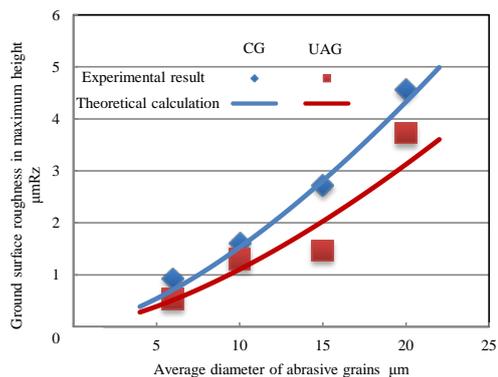


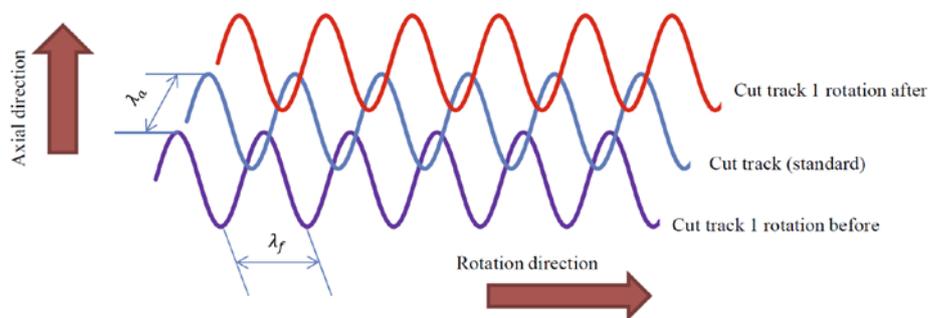
図 2.1.8 Results of Ultrasonic-assisted grinding: CG: Conventional grinding; UAG: Ultrasonic-assisted grinding

【振動重畳研削による検討 — 微細構造創成 —】

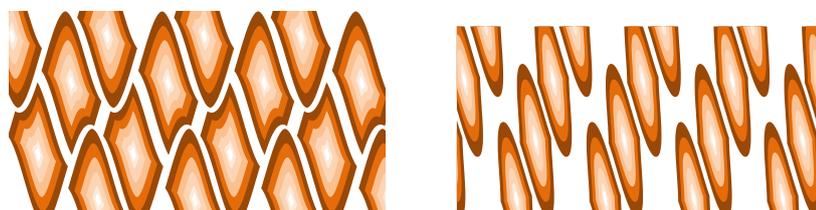
スラント研削およびオシレーション研削と超音波援用研削は研削面粗さ改善の機構が異なるため、両者を重畳することで研削面粗さのさらなる改善が可能である。また超音波振動により創成される切削痕の重畳を制御することで微細構造創成が期待される。

図 2.1.9 に微細構造創成の概念図を示す。本手法はスラント研削と超音波援用研削を組み合わせ、砥石を軸方向に移動させながら超音波援用研削によって創成される正弦波状の切削痕を図 2.1.9(a) に示すように重畳させることで残存部が図 2.1.9(b) のようになり微細構造が創成されるも

のである。この創成の理論上、最終的な加工面に残存する切削痕はその近傍において 1 個の砥粒切れ刃によるものである。この実験の条件を表 2.1.2 に示す。



(a) Superimposing of cut tracks fabricated by ultrasonic-assisted grinding.



(b) Remained structures.

図 2.1.9 Schematic of creation of micro- and submicro-structure using superimposed vibration assisted grinding.

表 2.1.2 Experimental conditions of fabrication of surface microstructures

Workpiece	Zirconia block 13×14×17 mm <sup>3</sup>
Grinding wheel	Electroplated diamond wheel ( $\phi$ 1)
Grain size (#)	600, 1000, 1500, 3000
Feed speed ( $v$ ) mm/min	0.5 ~ 5
Wheel speed ( $V$ ) mm/s	104.7 (2000 min <sup>-1</sup> )
Wheel depth of cut ( $\Delta$ ) $\mu$ m	50
Feed speed of wheel axial direction ( $v_a$ ) mm/min	0 ~ 6 (Slant feed)
Vibration frequency ( $f$ ) Hz	5.21, 2.08, 1.04, 0.42 (Oscillation grinding) 62×10 <sup>3</sup> (Ultrasonic-assisted grinding)
Vibration amplitude (2A) $\mu$ m	16, 40 (Oscillation grinding) 7 (Ultrasonic-assisted grinding)

実験結果表面の電子顕微鏡像を図 2.1.10 に示す。同図上段が倍率 20000 の像、下段が倍率 10000 の像を示している。同図のように、(a)の左上部や右下部のように微細構造が創成されない

部分も生じるが、原理上は超音波援用加工により微細構造を創成することが可能であることが明らかとなった。また本手法のように振動重畳研削により微細構造を創成する場合、切れ刃位置を設計した工具が有効であると考えられる。

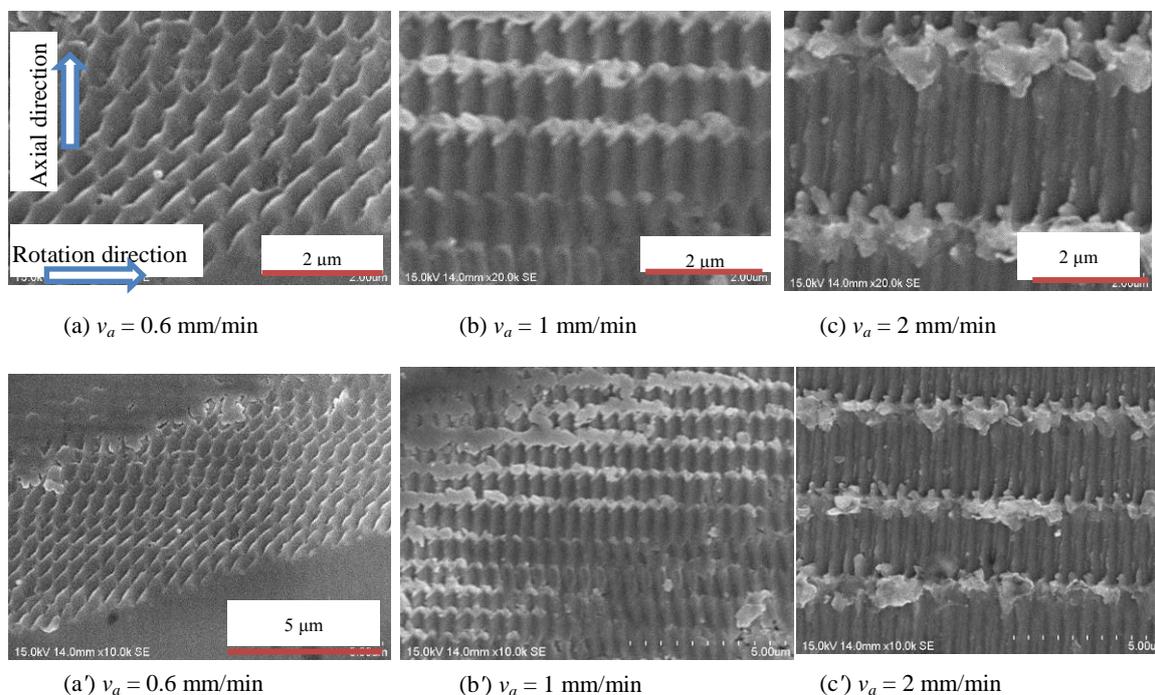


図 2.1.10 submicrostructures created with superimposed vibration grinding.

#### 【まとめ】

本節において得られた成果を以下にまとめる。

- スラント研削、オシレーション研削および超音波援用研削に関する統計的手法を用いた理論解析手法を提案した。本手法により振動研削全般に関して理論解析が可能となった。
- 本研究で提案した解析手法について実験により整合性を確認した。
- スラント研削と超音波援用研削を組み合わせた振動重畳研削において微細構造が創成可能であることを実験的に確認した。

## 2-1-2 超音波振動加工理論に基づくマイクロ工具設計と機能性表面の創成実験

表面微細構造とは材料表面のマイクロメートルからナノメートルオーダーの周期構造のことで、このような構造を有する表面は通常材料と異なる性質、例えば超撥水性<sup>5)</sup>や超親水性、無反射表面<sup>6)</sup>などの機能を持つ。このような性質は従来のものであり、従来の考え方では到達しえない新たなものづくりであり、所望の機能を付与させ得る加工法の開発が期待されている。表面微細構造の創成に対しては、これまでにフォトリソグラフィなどの半導体加工と類似の製造工程や成形金型を用いた成型工程、母型を用いた電鍍工程があり、またアスペクト比の大きな LIGA(X 線を用いたリソグラフィ・電解メッキ形成、Lithographie Galvanofornung Aboformung (ドイツ語))プロセスやナノインプリンティングプロセスなど提案されている<sup>7)</sup>。

一方、本研究室においては超音波振動の振幅の微細性と振動の再現性、周波数に注目し、超音波振動援用加工による微細構造創成について取り組んでいる。本手法により微細構造を創成することができれば、たとえば内面研削を行った同一のシステムを用いて、加工条件の変更のみで微細構造を創成することができ、形状創成と機能創成とを一貫して行うことが可能となる。本研究では前年度までの研究において、超音波援用研削法による表面微細構造の創成の可能性を見出すことができた。

### 【3D 超音波援用加工機の開発と振動の観察】

一般的な砥石軸方向に加えて、たわみ方向 2 軸に対して振動を援用可能な超音波スピンドル(以下、3D 超音波援用スピンドル)については、平成 22 年度において開発したものと振動方向は同様であるが、振動振幅を以前よりも大きく設定できるようになっており、微細構造創成により適した装置となっている。図 2.1.3 にスピンドルの仕様について示す。たわみ振動 2 軸は協調しており、回転振動となる。

表 2.1.3 本年度開発した 3D 超音波援用スピンドルの仕様

装置名称	SC-450SP-H24
メーカー	多賀電気株式会社
消費電力	150 VA
最大超音波出力	45 W
振動方向	軸振動(1 方向)、たわみ振動(2 方向)
振動周波数	軸振動 25.0 kHz $\pm$ 3 kHz たわみ振動 19.0 kHz $\pm$ 2.0 kHz
片振幅(0-p)	軸振動 1.5~3 $\mu$ m たわみ振動 10~15 $\mu$ m
回転速度	3000 min <sup>-1</sup>

振動の状態について高速度カメラを用いて確認を行った。高速度カメラは株式会社 KEYENCE VW-9000 に高解像度ズームレンズ VH-Z500R を取り付けて拡大倍率 500 倍にて撮像を行った。振動周波数が縦振動方向で 40 kHz、たわみ振動方向で 20 kHz であることと解像度を考慮し、シャノンのサンプリング定理からサンプリングフレーム数は縦振動において 230,000 fps たわみ振動において 57,000 fps とした。表 2.1.4 に高速度カメラの画像解像度とサンプリングフレーム数の関係を示す。高速度カメラにおいて画像解像度とサンプリングフレーム数はトレードオフの関係となるので、本事業では視野を重視してサンプリングフレーム数を決定した。また測定時のセットアップを図 2.1.11 に示す。同図に示すように作業台に置いた状態で撮像を行った。

表 2.1.4 高速度カメラ VW-9000 の画像解像度とサンプリングフレーム数

サンプリングフレーム数 fps	画像解像度 pixel
6000	640 x 320
10,000	640 x 192
23,000	320 x 160
57,000	160 x 112
150,000	160 x 42
230,000	160 x 32

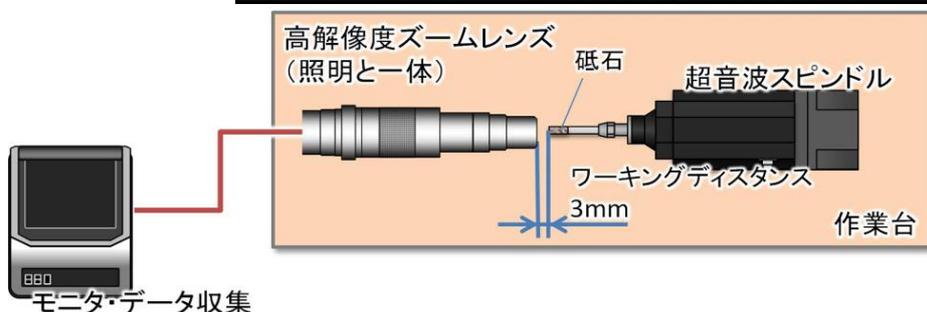


図 2.1.11 高速度カメラによる超音波振動の観察

図 2.1.12 に砥石底面にある砥粒の一部の運動を追跡した際の連続像を示す。三角形は目視による砥粒形状のフィッティングの結果である。自動エッジ検出が不可能であったため今回は目視によるフィッティングを行い、その座標からフレームごとの移動距離を測長した。同図に示すように砥粒の運動軌跡を追跡することが可能であることが確認された。またこの撮像結果をもとに X 方向と Y 方向への移動量を図 2.1.13 にまとめる。同図(a)は横軸に時間、縦軸に X 方向および Y 方向への移動量を示しており、(b)は XY 平面内における移動軌跡を示している。XY 両方向において片振幅 20  $\mu\text{m}$  程度の強い振動を得られていることが確認できる。表 2.1.3 の仕様の数値以上であるが、実際の加工においては有利に働くと予想される。また図 2.1.13(a)の結果をもとに、高速フーリエ変換(FFT)した結果を図 2.1.14 に示す。同図より、XY 両方向において 19.6 kHz で周波数のピークが現れていることが確認できる。これは装置仕様と一致している。以上により実験装置のたわ

み振動振幅について確認することができた。

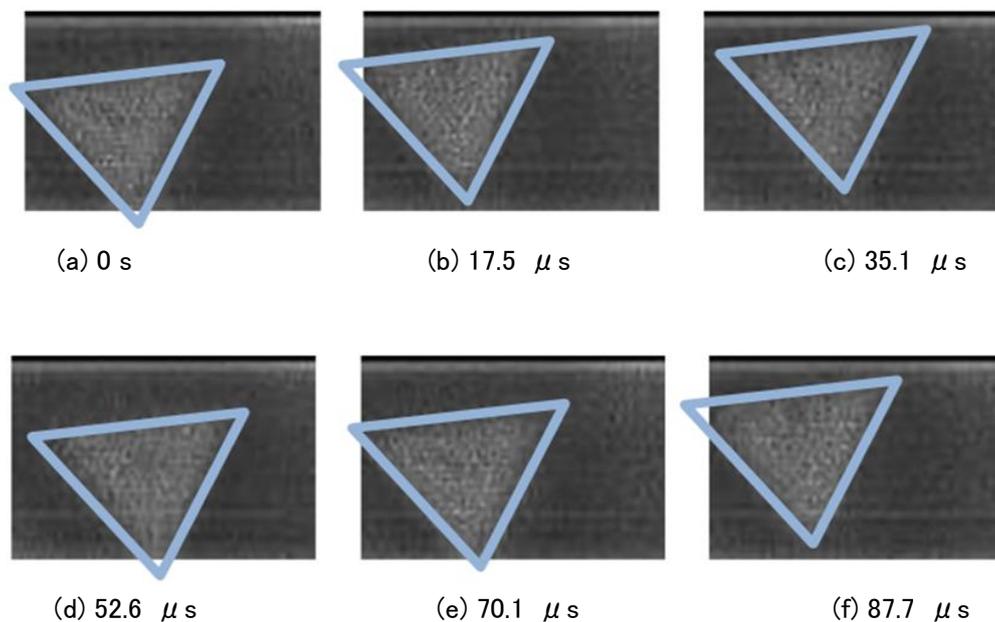
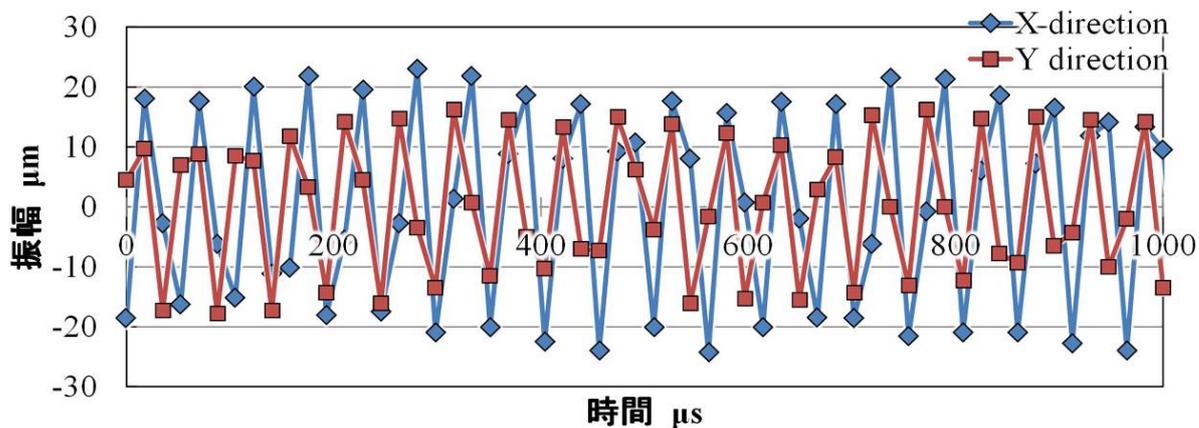
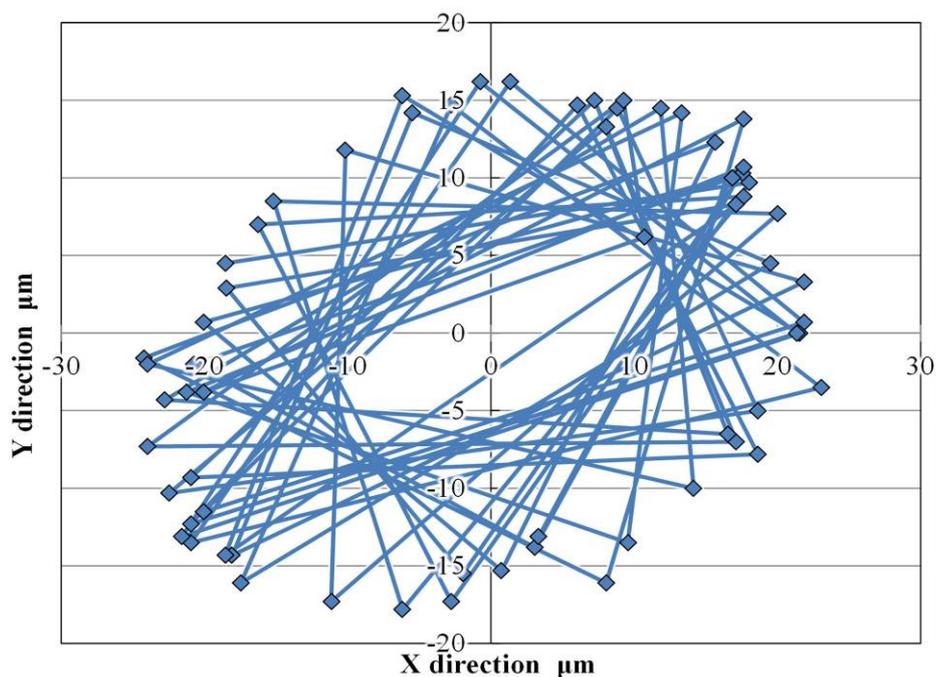


図 2.1.12 高速度カメラによる撮像結果(三角形マーキングは目視による)



(a) 砥粒追跡軌跡(時間-移動)

図 2.1.13 たわみ振動加振時の砥粒の移動軌跡



(b) XY 平面内移動軌跡

図 2.1.13 たわみ振動加振時の砥粒の移動軌跡(続き)

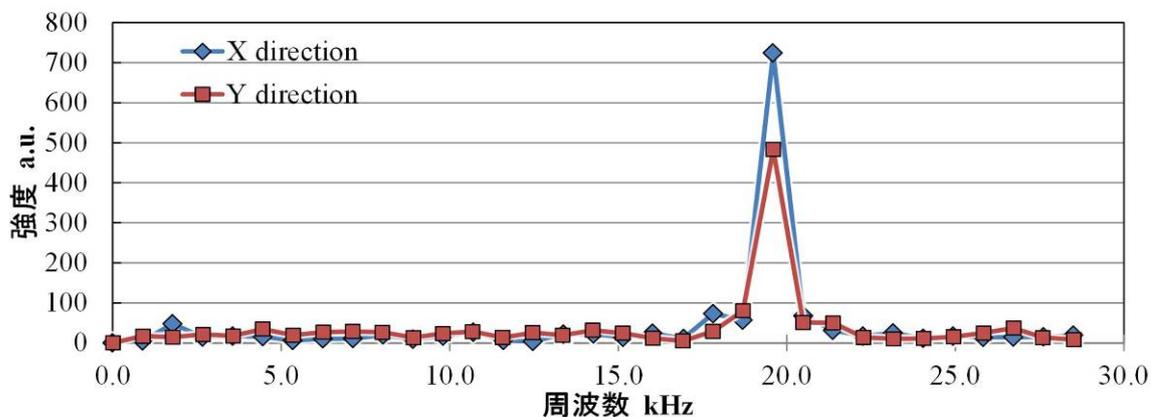


図 2.1.14 たわみ振動加振時の砥粒軌跡を用いた FFT 解析結果

一方、軸振動に関しては振動振幅が小さく、また周波数が大きいため、サンプリングフレーム数を大きくし、撮像面を拡大しても測定は不可能であった。また軸振動とたわみ振動を複合したハイブリッド振動の場合においてはZ方向にも移動することにより撮像対象がぼやけてしまうため、XY方向の振動に関しても測定することができず、協調による相互影響については更なる解析が必要である。

【通常砥石による微細形状創成実験】

平成 23 年度において微細構造の創成が確認されたものの、微細構造創成のメカニズムに関してはより詳細な検証を行う必要があった。そこで平成 24 年度は開発機による追加実験を行うとともに、ダイヤモンド砥粒単粒を電着した砥石を開発し、微細構造創成のメカニズムについて検証を行った。まず通常砥石を用いた場合の実験結果を示す。

まず図 2.1.15 に実験の基本的な構成を示す。超音波振動援用加工による微細構造創成における機械パラメータは、同図に示す回転数  $N$ 、工具直径  $D$ 、軸振動周波数  $f_i$  と振幅  $A_i$ 、たわみ振動周波数  $f_b$  と振幅  $A_b$ 、工作物送り速度  $v$ 、軸方向移動速度  $v_a$  の 8 個である。また砥石を用いる場合、平均粒径  $d_g$  も重要なパラメータとなる。表 2.1.55 に今年度開発したスピンドルによる検証実験の条件詳細を示す。本条件では砥石を工作物に対して  $45^\circ$  方向に相対運動させることになる。

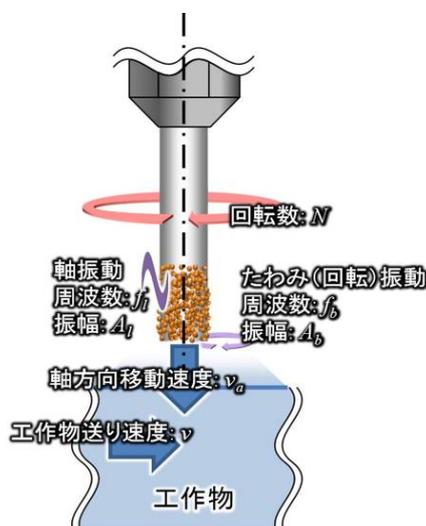


図 2.1.15 微細構造創成実験の模式図

表 2.1.5 微細構造創成実験の加工条件

回転数 $N$	1000 rpm
工具直径 $D$	1 mm
軸振動周波数 $f_i$	25 kHz
軸振動振幅 $A_i$	1.5 $\mu$ m
たわみ振動周波数 $f_b$	19 kHz
たわみ振動振幅 $A_b$	15 $\mu$ m
工作物送り速度 $v$	3 mm/min
軸方向移動速度 $v_a$	3 mm/min
平均粒径 $d_g$	15 $\mu$ m (#1000)
工作物	NiP メッキ

また創成される微細構造の円周方向ピッチ  $p_c$ 、軸方向ピッチ  $p_l$  は加工パラメータを用いて次式で求められる。

$$p_c = \frac{N\pi D}{f_l} \quad \text{または} \quad p_c = \frac{N\pi D}{f_b} \quad (1)$$

$$p_l = \frac{v_a}{N} \quad (2)$$

式(1)、(2)により微細構造のピッチを計算すると、軸振動援用時に  $p_c = 2.1 \mu\text{m}$ 、 $p_l = 3 \mu\text{m}$  たわみ振動援用時に  $p_c = 2.76 \mu\text{m}$ 、 $p_l = 3 \mu\text{m}$  となる。

図 2.1.16 に軸振動援用研削、図 2.1.17 にたわみ振動援用研削の加工表面の走査型電子顕微鏡(SEM)写真結果を示す。両図における(a)、(b)、(c)は撮像位置の違いであり、同一の砥石を用いた加工結果である。両図において、計算で求められたピッチと同等の構造が創成されることが確認できる。一方、図 2.1.16 においては軸方向振動による切削痕が重畳することにより複雑な形状が創成されていることが確認できるのに対し、図 2.1.17 ではたわみ振動による砥粒を工作物へ押し付ける運動の転写が確認できる。また撮像範囲の  $30 \mu\text{m}$  角程度の範囲においては均一な構造を有するものの、巨視的には創生される構造が大きく異なることも確認できる。これは砥石の近傍内で特に突き出した砥粒が微細構造創成に対して主導的な役割を果たし、限られた領域内では均一な構造を創成し、また微細構造の創成に砥粒切れ刃の形状による影響が大きく作用していることを示している。

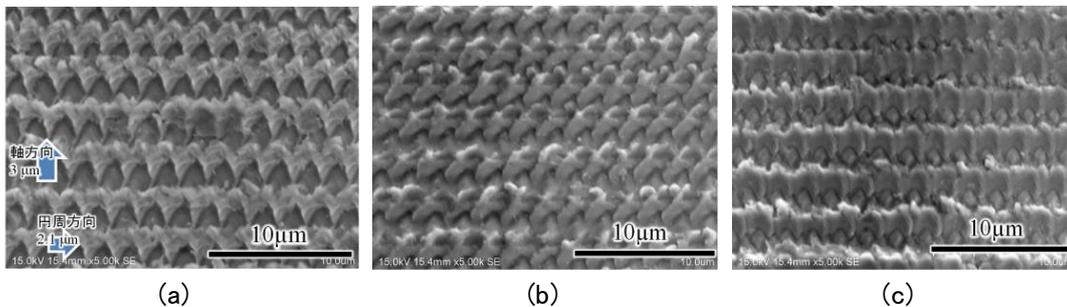


図 2.1.16 軸振動による微細構造

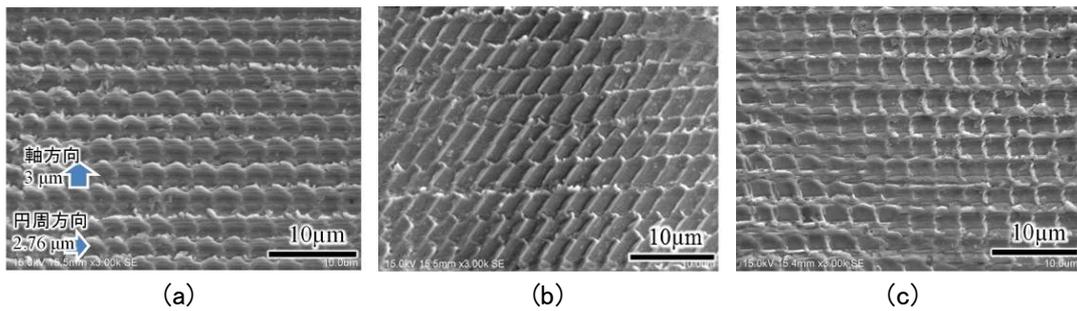


図 2.1.17 たわみ振動による微細構造

【単粒ダイヤモンド砥石による微細形状創成実験】

次に単粒ダイヤモンド工具による微細構造創成の検証実験について示す。図 2.1.18 に単粒ダイヤモンド工具の図面を示す。 $\phi 3$  超硬シャンクの先端に  $100 \mu\text{m}$  程度の砥粒を電着した工具を用い、そのプロフィールを測定した上で加工することにより、砥粒形状による微細構造の変化と工具摩耗について検証することができる。図 2.1.19 に創成した工具の写真を示す。工具の製作はジャスト株式会社に依頼し、工具先端から  $1 \text{mm}$  程度の位置に単粒ダイヤモンドを仮固定し、その上からニッケル膜でコーティングすることにより固定している。

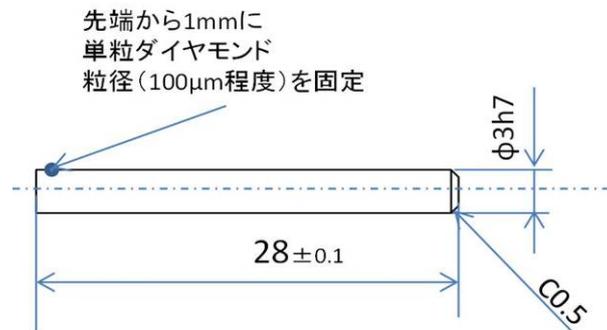


図 2.1.18 単粒ダイヤモンド工具

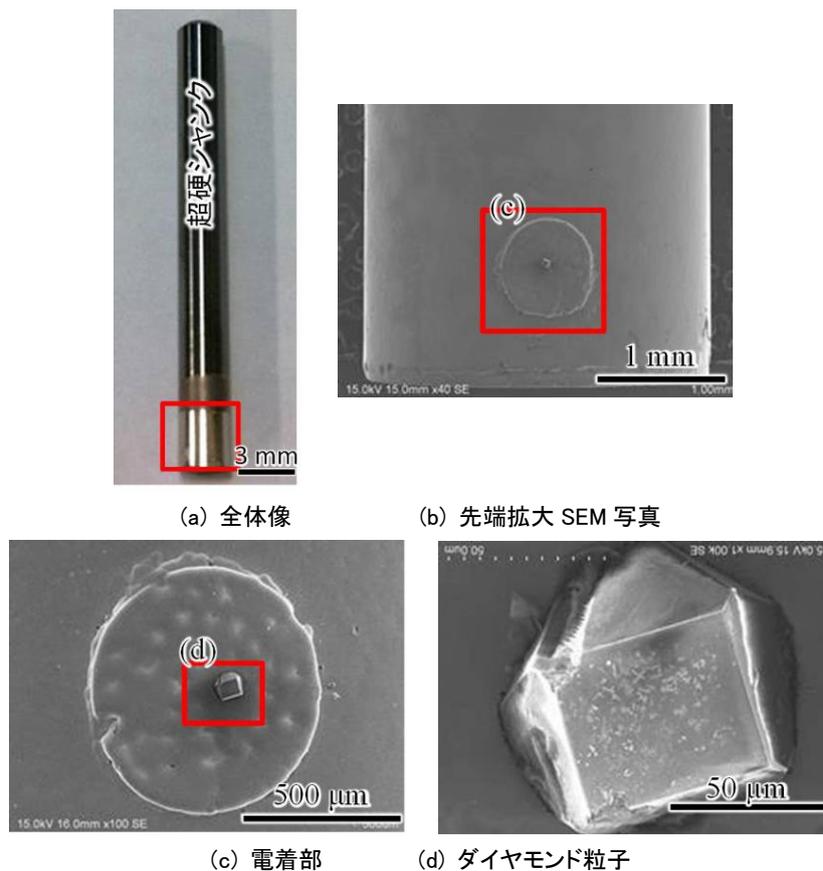


図 2.1.19 創成した単粒ダイヤモンド工具の写真

単粒ダイヤモンド砥石による加工実験の条件を表 2.1.6 に示す。本実験においては 62kHz / 3  $\mu$ m の軸振動のみ援用可能な 1 軸スピンドルも用い、条件を変化させた。また本実験においては切れ刃同士の相互作用が起こらないため、軸方向へのみ砥石を移動させた。また回転速度と軸方向移動速度を変化させて創成される微細構造の違いについて検証した。

表 2.1.6 微細構造創成実験の加工条件

回転数 $N$	200, 500, 1000, 1500 rpm
工具直径 $D$	3 mm
軸振動周波数 $f_i$	25, 62 kHz
軸振動振幅 $A_i$	1.5, 3 $\mu$ m
工作物送り速度 $v$	0 mm/min
軸方向移動速度 $v_a$	2, 3 mm/min
粒径 $d_g$	100 $\mu$ m 程度
工作物	NiP メッキ

図 2.1.20 に回転数を変化させた場合、図 2.1.21 に軸方向移動速度を変化させた場合、図 2.1.22 に振幅と周波数を変えた場合の実験結果を示す。それぞれの図において、微細構造が創成される場合にはその形状が相似なことから、通常砥石を用いた加工における加工原理が砥石領域の中で突出しが特に大きな砥粒が微細構造を創成するという予想を支持している。図 2.1.20(b)と比較して図 2.1.20 (c)では微細構造の回転方向ピッチが半分となっており、回転速度によって構造を制御することができる。

一方、図 2.1.20 (a)ではバリ発生により構造が乱れており、また図 2.1.20 (d)においてはピッチが短くなりすぎるため砥粒軌跡が転写できず平滑な様子となっている。図 2.1.21 において(c)、(d)では均一な微細構造が確認できる。一方、 $v_s$  の小さい(a)、(b)においては構造が乱れているが、これは機械のスティック・スリップによる移動分解能の限界と考えられる。また(e)においては振動の山谷部における材料盛り上がりが残存したバリが確認できる。したがって、同一切れ刃による振動軌跡をある程度重畳させたほうがバリ除去に効果があると考えられる。図 2.1.22(b)からもバリの生成に関して同様のことが確認できる。また図 2.1.21 から、円周方向ピッチに関しては制御できるのに対し、軸方向においてはバリが残存しやすいことが確認できる。以上から、微細構造創成には適した条件が存在すること、また超音波振動に関しては振幅の制御幅が重要であると考えられる。

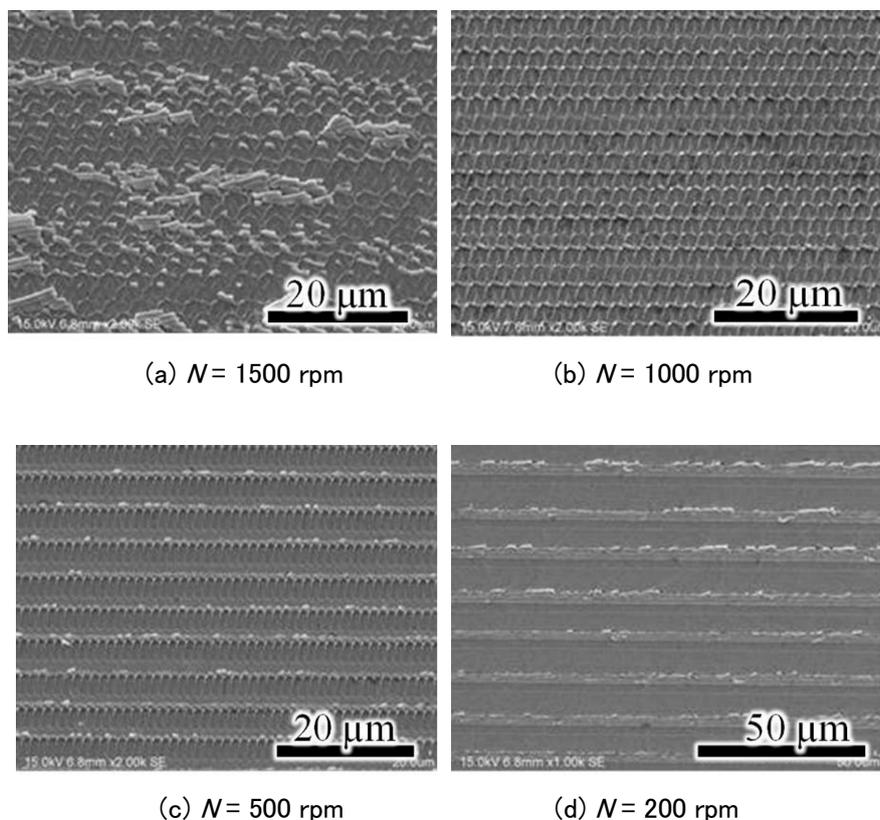


図 2.1.20  $f = 62 \text{ kHz}$ ,  $A_f = 3 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $v_s = 2 \text{ mm/min}$  としたときの加工面

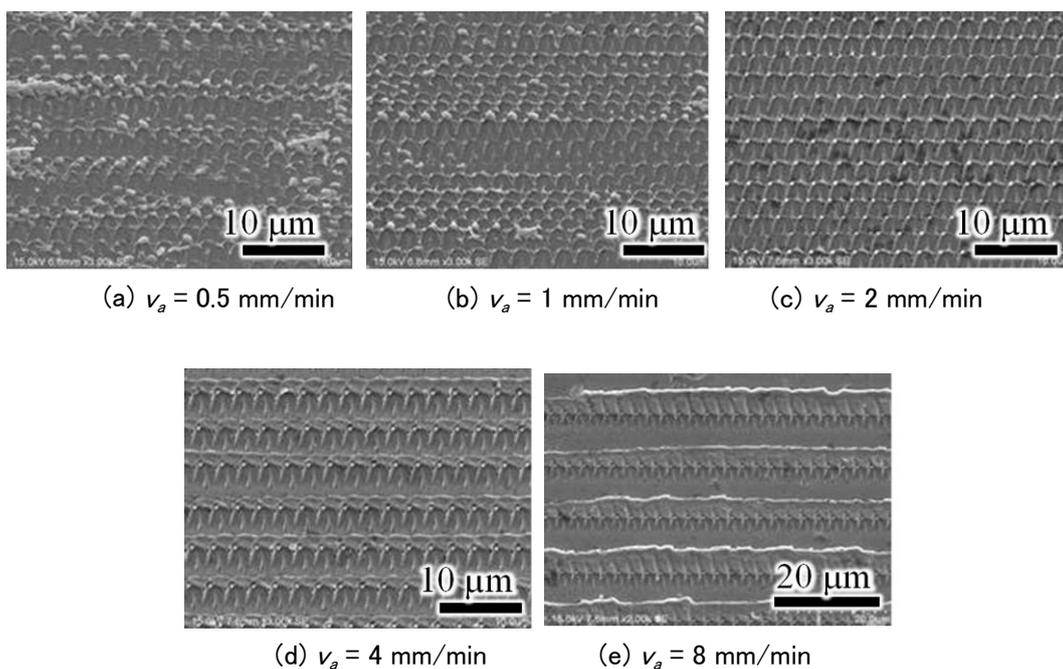


図 2.1.21  $f = 62$  kHz,  $A_f = 3$   $\mu$ m,  $N = 1000$  rpm としたときの加工面

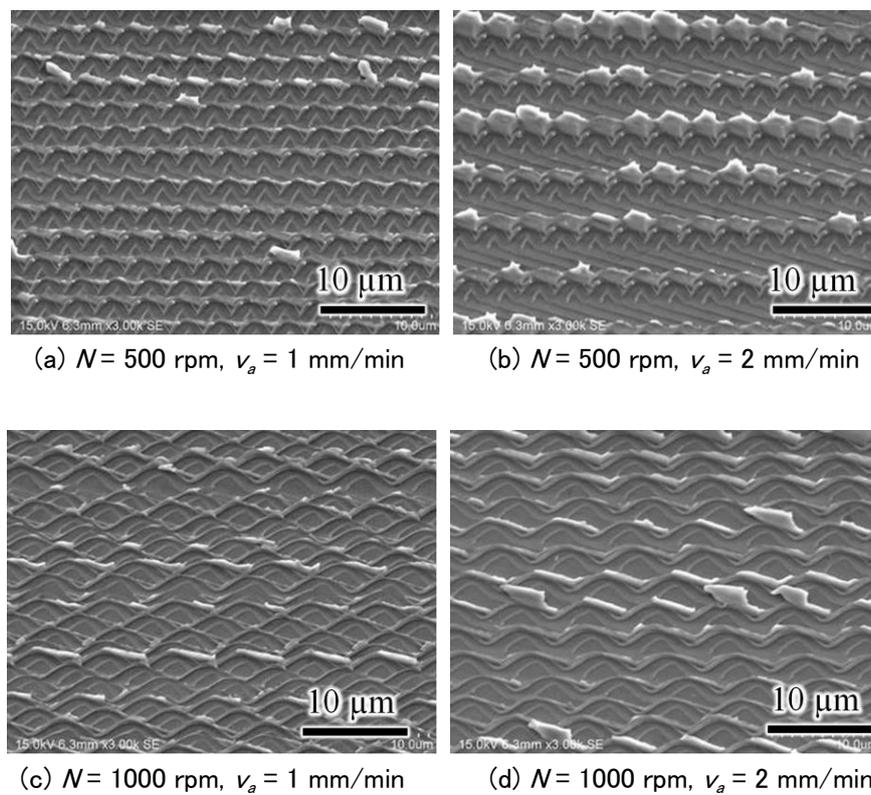


図 2.1.22  $f = 25$  kHz,  $A_f = 1.5$   $\mu$ m としたときの加工面

なおたわみ振動による実験も行ったものの、単粒の場合には衝撃力が集中するために砥粒が破砕してしまい加工することができなかった。

#### 【まとめ】

平成 24 年度の研究のまとめを以下に示す。

- 3D 超音波援用スピンドルについてたわみ振動が従来よりも大きな新型機を開発し、高速カメラによってその振動状態を確認した。
- 通常砥石を用いて軸振動およびたわみ振動を援用した研削実験を行い、理論に従ったピッチの構造が創成されることを確認した。
- 単粒ダイヤモンド砥石を開発し、微細構造創成の規則について検証した。またバリの発生を確認した。

## 2-1-3 内面研削用超音波スピンドルの試作

### 【超音波援用研削の基礎実験】

市販の超音波スピンドルを使用して内面研削加工を行い、超音波振動の援用効果を検証した。その結果、従来研削に超音波振動を援用することで、研削抵抗の低下と砥石表面の目詰まり防止に大きな効果が現れることを確認した。研削抵抗は、仕上がり時の砥石軸のたわみ量を反映する加工内周面の円筒度によって評価した。さらに超音波援用による切屑の変化を観察し、さらにアルミニウム合金を加工した後の砥石表面の変化を観察した。

### 研削条件

工作物と硬度： A5052P、40HRC 以上

砥石： BZ325PM2200V(W) (ビトリファイドボンド CBN 砥石、粒度#325、FSK 社製)

主軸の回転速度：  $1000 \text{ min}^{-1}$  (アップカット研削、回転方向：砥石軸と反対)

研削砥石の回転速度：  $20000 \text{ min}^{-1}$

研削代： 約 0.4 mm(直径)

#### 研削サイクル

粗研速度： 0.02 mm/s

精研速度： 0.005 mm/s (精研ストローク： 0.01 mm)

スパークアウト時間： 1.0 s

Z テーブルのオシレーション： なし

超音波振動： 周波数 40 kHz 振幅(p-p) 4.7  $\mu\text{m}$  (超音波スピンドル： industria 社製)

#### ドレッシングサイクル

ドレッシングトラバース速度： 50 mm/s (砥石速度：  $20,000 \text{ min}^{-1}$ )

ドレス切込み量： 0.002 mm/pass

クーラント： 鉱物油

円筒度測定長さ： 7 mm (3 点測定)

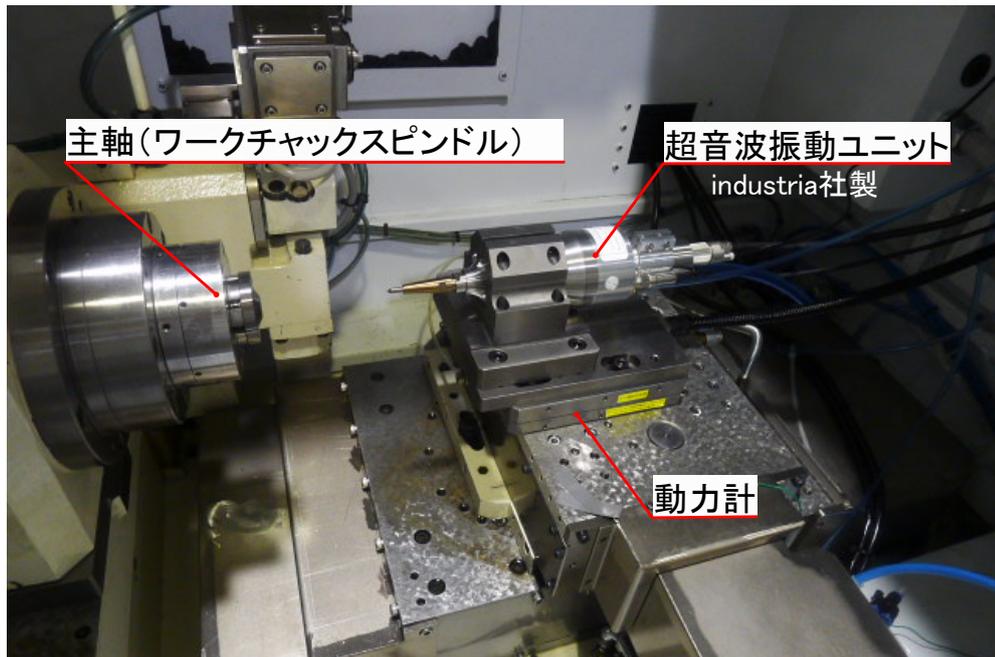


図 2.1.23 超音波加工専用実験装置

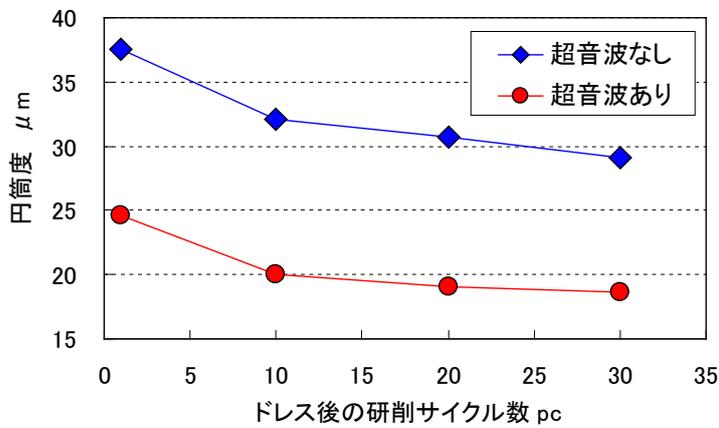
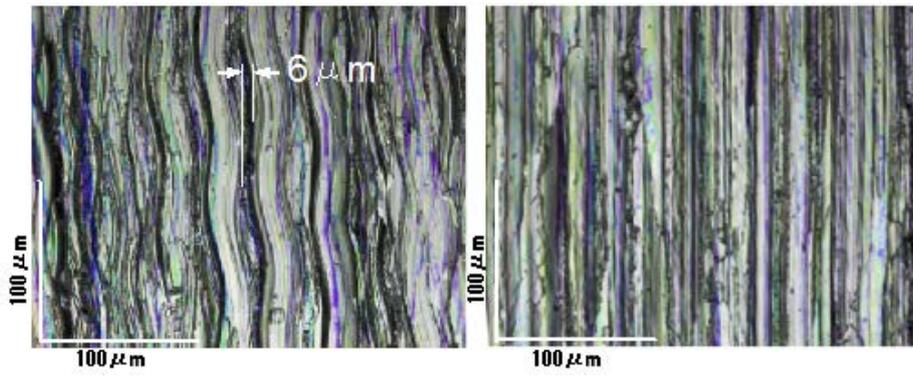


図 2.1.24 超音波援用効果

超音波振動を援用することで研削抵抗が下がり、円筒度が向上した。30 本連続加工において、ほぼ一定の援用効果を確認。

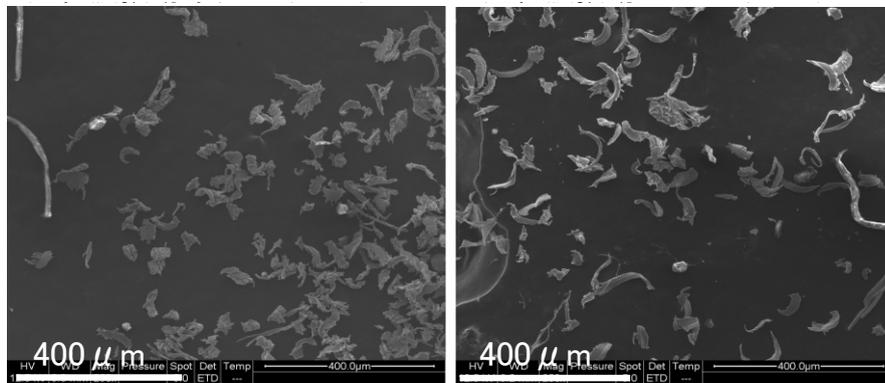


(a) 超音波振動あり

(b) 超音波振動なし

図 2.1.25 加工表面の拡大映像

測定器：レーザー顕微鏡（キーエンス）



(a) 超音波振動有り  
フレイク状の切屑

(b) 超音波振動無し  
紐状の切屑

図 2.1.26 切屑のSEM像

（山形県工業技術センター提供）

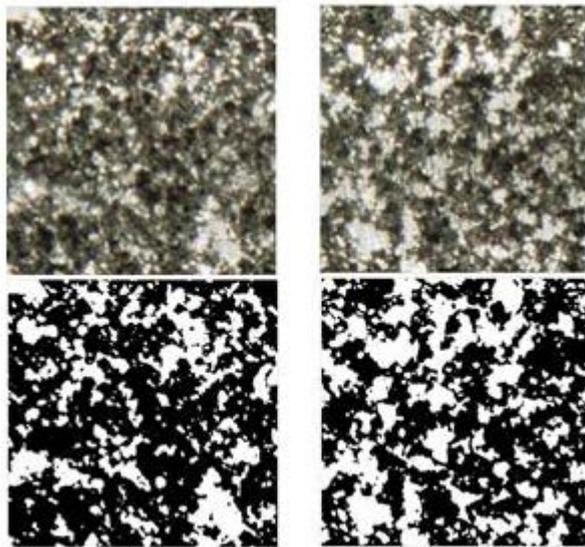


図 2.1.27 アルミニウム合金 30 本研削後の  
砥石表面

砥石表面白色の物質：アルミニウム合金  
上：顕微鏡映像(100倍)  
下：2値化処理画像

(a) 超音波振動有り (b) 超音波振動無し

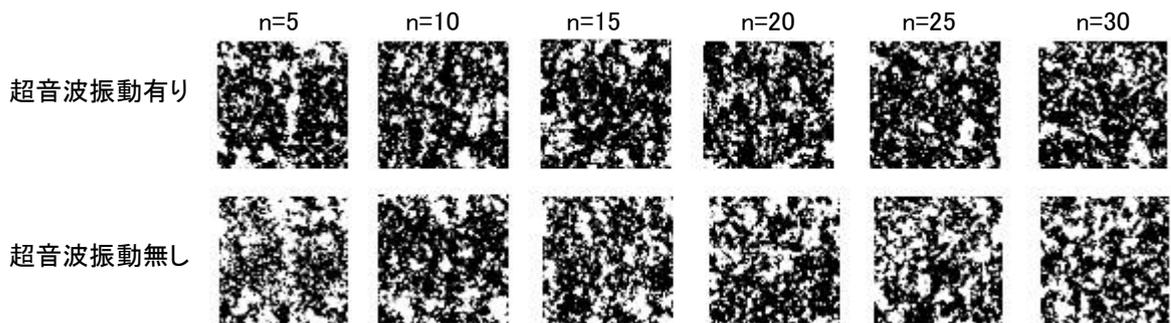


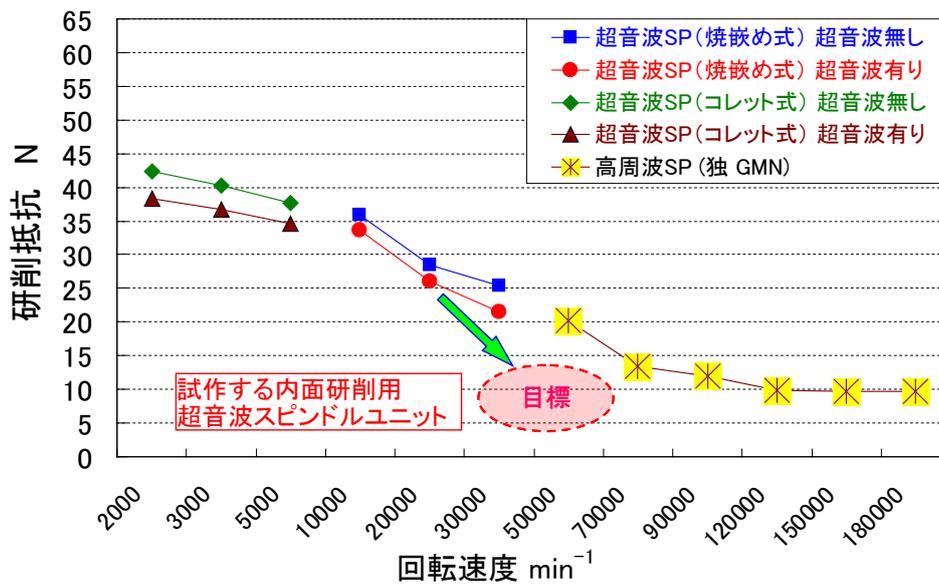
図 2.1.28 砥石表面の2値化処理画像

研削後 5 本目から 30 本目までの推移

回転する砥石に超音波振動を与えることで、加工表面における砥粒軌跡は、正弦波状になることを確認した。また、切屑は大きい紐状のものから、小さいフレーク状に変化することも確認できた。この切屑の形状とサイズの変化により、切屑の排出が促され、切屑の研削点への巻き込むことによる砥石表面の目詰まりを防止する効果をもたらすと推測できる。

#### 【開発コンセプトと性能評価】

現状の量産ラインにおいて使用されている内面研削用超音スピンドルを用いて、砥石の回転速度と加工能力の関係を研削抵抗の測定により検証した。また市販の超音波スピンドルを用いて、砥石の回転速度と超音波援用効果の変化を同様の加工サイクルで検証した(図 2.1.29 参照)。



砥石周速 25 38 63 126 251 377 628 879 1130 1507 1884 2261 m/min

実験範囲 2000~5000 min<sup>-1</sup> : 多賀電気社製超音波スピンドルを使用

実験範囲 10000~30000 min<sup>-1</sup> : industria 社製超音波スピンドルを使用

実験範囲 50000~180000 min<sup>-1</sup> : GMN 社製スピンドルを使用

図 2.1.29 砥石回転速度と研削抵抗、および超音波援用効果の変化

この結果、回転速度 70000 min<sup>-1</sup>、砥石周速約 900 m/min 付近を変曲点として研削抵抗の低下は緩慢になり、120000 min<sup>-1</sup>、砥石周速約 1500 m/min で横ばいとなった。また、超音波振動の援用効果に関しては、30000 min<sup>-1</sup>、砥石周速約 380 m/min までは、概ね一定の効果が得られることを確認した。この結果を踏まえ、自社保有の内面研削加工データ、そして国立大学法人東北大学大学院工学研究科厨川研究室の理論解析の結果を総合的に判断して量産ラインでの使用に適した内面研削用超音波スピンドルの開発コンセプトを以下に設定した。

#### A. スピンドルのラジアル剛性の強化

砥石のラジアル方向の力による砥石軸、および振幅拡大ホーンのたわみを抑制するため、砥石とベアリングとの距離を短縮した振幅拡大ホーンを製作する。長時間の荷重においても高い回転精度を維持するため、スピンドルシャフトを 2 組のアンギュラボールベアリングで支える構造とする。(図 2.1.30,図 2.1.31 参照)

#### B. 超音波振動の振幅拡大

砥石表面の目詰まりを抑制するため、研削液中で洗浄効果をもたらすキャビテーションが発生しやすい帯域である 40 kHz に設定する。さらに、超音波振動による表面粗さ向上効果を持たせるために振動振幅を 10 μm<sub>p-p</sub> 以上とする。

C. 最高回転速度の高速化

超音波スピンドルの駆動モータをスピンドルシャフト中央に搭載したビルトインモータタイプの構造にして回転バランスを向上させ、最高回転速度  $50000 \text{ min}^{-1}$  で内面研削を可能にする。

D. 量産ラインに適した作業性の向上

生産ラインでの稼働率を考え、砥石をねじ締結方式で交換可能とする<sup>8)</sup>。また超音波振動子への給電部には非接触式を採用し、カーボンブラシの交換を不要にする。

研削砥石(直径4mm)



図 2.1.30 内面研削用超音波スピンドル外観

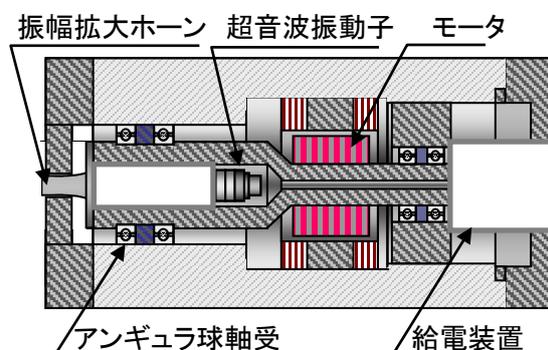


図 2.1.31 内面研削用超音波スピンドルの構造

平成 24 年度に製作した内面研削用超音波スピンドルユニットにて材質アルミニウム合金 A5052P、クロムモリブデン鋼 SCM435 の内周面を砥石の回転速度を変化させ、仕上がり表面粗さと真円度を評価した。加工条件は表 2.1.7 に示す。

なお、最高回転数  $50000 \text{ min}^{-1}$  では、現時点において実験で使用できるレベルには至らず、 $30000 \text{ min}^{-1}$  以下の使用範囲にとどめた。それ以外は上記開発コンセプトをすべて実現している。

表 2.1.7 Experimental Conditions

Ultrasonic vibration		Frequency	40 kHz
		Amplitude	$10 \mu\text{m}_{p-p}$
Grinding wheel	Spec.	Vitrified CBN, 4 mm dia. (grit size $7.5 \mu\text{m}$ )	
	Rotational speed	$10000, 20000, 30000 \text{ min}^{-1}$	
Workpiece	Material	SCM435(50HRC), A5052P(40HRC)	
	Size	ID 4.4 mm, 9 mm long	
Work-table feed rate		0.0025 mm/s	
Depth of cut		$40 \mu\text{m}$	
Coolant		Mineral oil	

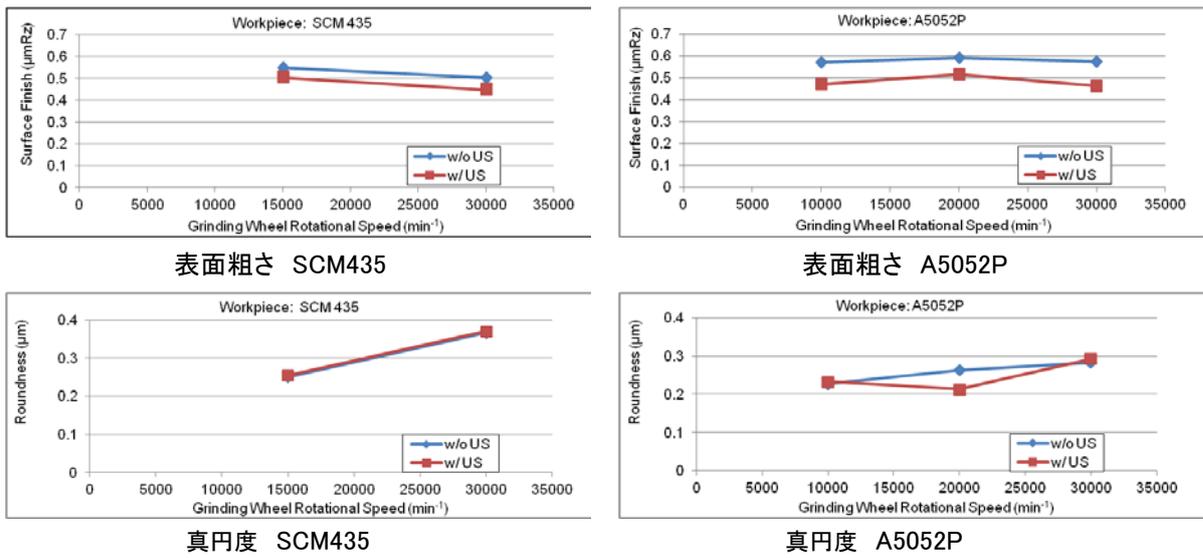


図 2.1.32 超音波援用効果による表面粗さと真円度の変化

A5052P、SCM435 ともに超音波振動を援用することで、理論解析通りに表面粗さが向上することを確認した。真円度に関しては、現時点では明確の優位性は確認できていない。

#### 2-1-4 超音波援用効果の最大化とその検証

超音波援用効果は研削抵抗に依存して変化することを以前より捉えていたが、動力計を用いて超音波援用効果と研削抵抗との関係をモニタリングした。モニタリング方法は、 $4000 \text{ min}^{-1}$  で回転する砥石を、アルミニウム合金 (A5052P) の工作物内周面に対して速度  $0.083 \text{ mm/s}$  で前進させて押し付け、研削抵抗が  $30 \text{ N}$  になるまで砥石軸 (超硬合金製) をたわませる。その後、砥石切込みを停止させ、砥石軸のたわみの反力により研削を行ない、その時の研削抵抗を  $60 \text{ s}$  測定した。研削抵抗の低下の勾配は、砥石軸たわみの戻りの速さを示す。すなわち、研削抵抗の急な低下ほど、高い研削効率を示す。

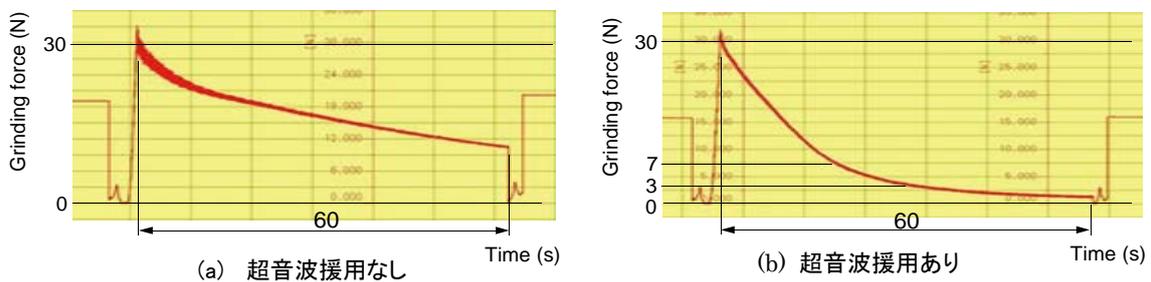


図 2.1.33 超音波援用効果と研削抵抗の関係

その結果、超音波振動を援用しない場合は、加工開始時の工作物振れを除去する間、研削抵抗の急な低下を確認するが、その後はほぼ一定の割合で研削抵抗が低下している(図 2.1.33(a) 参照)。一方、超音波を援用した場合は、超音波を援用しなかった場合と比較して、急激な研削抵抗の低下が確認できる。さらに研削抵抗  $5 \text{ N}$  付近を境に研削抵抗の変化が緩慢になることを確認した(図 2.1.33 (b)参照)。この結果は  $5 \text{ N}$  を境に超音波援用効果が大きく異なることを意味している。

そこで、動力計を内面研削盤のコントローラとリンクさせ、砥石切込みスライドを研削抵抗値でフィードバック制御し、定圧加工サイクルを可能とした。そこで  $3 \text{ N}$  と  $7 \text{ N}$  で同一量を定圧研削サイクルで研削し、超音波振動援用効果を比較した。

その結果、 $3 \text{ N}$  で超音波振動を援用した場合、加工時間は従来研削の約  $2$  分の  $1$  になったのに対して  $7 \text{ N}$  の加工時間は、従来研削の約  $5$  分の  $1$  以下の時間になることを確認した。

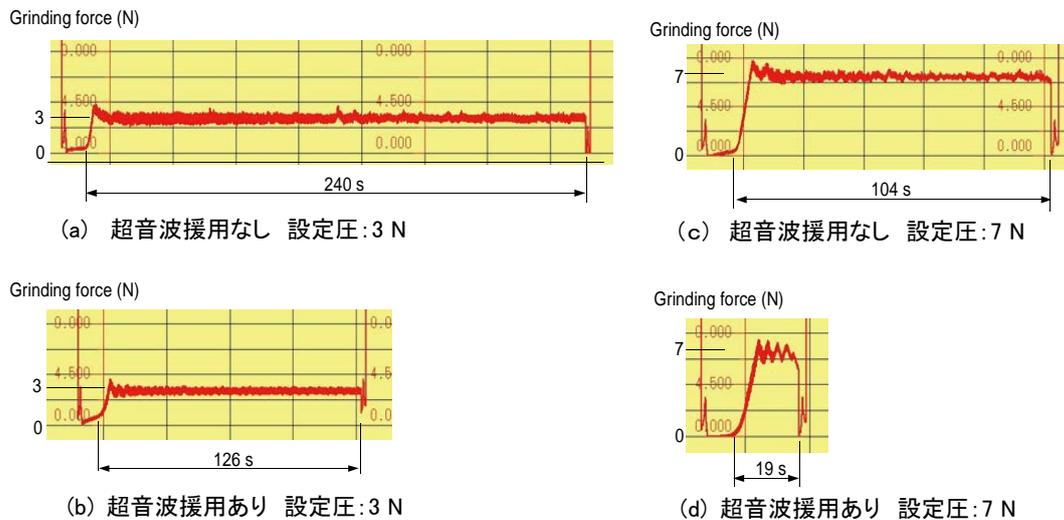


図 2.1.34 超音波援用効果による設定圧と加工時間の変化

【まとめ】

内面研削用超音波スピンドルの動作試験においては、回転部品の遠心破壊や導線の断線、また、超音波振動による砥石ねじ部の異常発熱や破損などのトラブルを都度改善し、最高回転速度以外のすべての開発コンセプトを実現できた。

加工精度においては、表面粗さ  $0.6 \mu\text{mRz}$  以下、真円度  $0.3 \mu\text{m}$  以下を得ており、十分実用に耐えるレベルにあると判断する。超音波援用効果も研削抵抗の低下はもちろん、理論解析通りの表面粗さ向上効果が得られることも確認した。さらに、動力計と内面研削盤をリンクさせ、定圧研削サイクルにより超音波援用効果の最大化を図り、加工効率は従来研削の 5.5 倍にまで達した。

## 2-2 超音波電解ハイブリッド内面研削盤の開発

### 2-2-1 電解研削専用電源の試作とその性能評価

#### 【電解研削への超音波援用効果】

電解研削は工作物を陽極、そして砥石、正確には導電性物質の砥石母材を陰極にして、その間に電解液を満たして工作物を電気分解させながら研削する加工法である(図 2.2.1)。砥粒は電極のスペーサとしての役割も有することから、砥粒サイズが小さくなれば電極が接近し、電極間でスパークが発生しやすくなり、発生したスパークは加工表面を劣化させる。そして、さらに電極が接近すれば電位差が維持できなくなり電解反応は停止する。このような理由から、電解研削における電極間距離は一般的には 0.02 mm 以上必要とされていた<sup>9)</sup>。砥粒サイズの約半分を電極間距離と仮定すると、0.02 mm を確保するには粒度#400 より粗い砥粒が必要となるが、この粒度の砥石はそれ自体である程度の研削性を有する。そのため、ある特定の加工以外は、加工の高効率・高精度化には、砥石スピンドルの高速化によって対応する方法がとられるようになった。

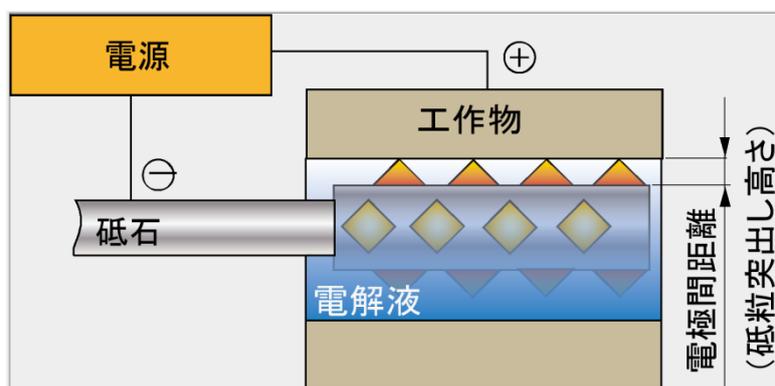
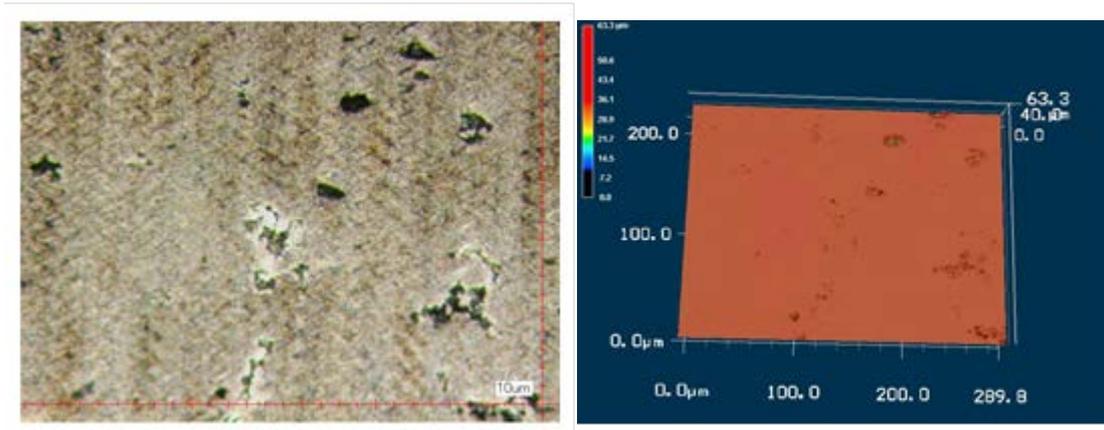


図 2.2.1 電解研削の模式図

そこで、従来よりも狭い電極間距離、つまりより微細な砥粒で、高能率の鏡面研削加工や高アスペクト比小径内周面の研削加工ができる超音波電解ハイブリッド内面研削盤の開発を行ない、電解研削の適応範囲の拡大を図った。

粒度#325 の電着ダイヤモンド砥石を用いて Fe 材の工作物内周面の電解研削加工が可能なことを確認し、砥石だけ粒度#2000 の電着ダイヤモンドに変更したところ、電解反応は起こらず、電解研削は行えなくなった。その状態において、砥石に超音波振動を伝搬させることで、不安定ではあるが電解反応が起こることを確認した。しかし、電極間に発生するスパークにより加工表面にピットの生成など、加工品質の制御は困難であった(図 2.2.2 参照)。そこでスパークを発生させない低い電圧を高い周波数パルスで電極に印加し、そこに 50 kHz の超音波振動を砥石に援用することで、電極間距離 0.005 mm 以下においても、スパークを発生させず、そして短絡をさせずに電解研削が可能となった。その時の加工条件を表2に示す。加工効率は、電解作用、超音波振動を OFF の状態にした従来研削の 3 倍以上となった(図 2.2.3(c)参照)。



(a) 加工面に点在するピット

(b) 工作物表面(レーザ顕微鏡)

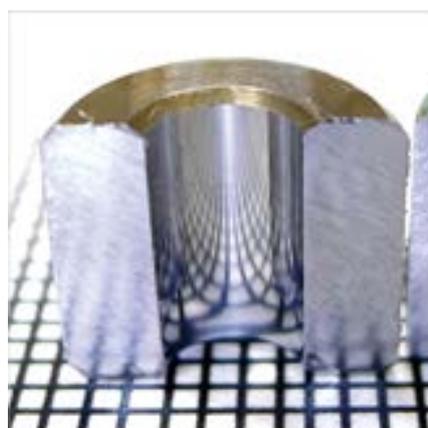
正弦波状の切削痕を確認

図 2.2.2 ピットが発生した超音波電解研削面

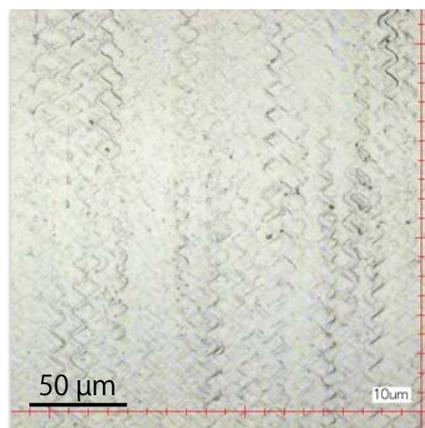
表 2.2.1 Experimental Conditions

Ultrasonic vibration ※		Frequency	50 kHz
		Amplitude	8 μm <sub>p-p</sub>
Grinding wheel	Spec.	Electroplated Diamond. (grit size 10 μm) OD 4.0 mm, 10 mm long	
	Rotational speed	4000 min <sup>-1</sup>	
Workpiece	Material Size	SCM435, ID 4.4 mm, 9 mm long	
	Rotational speed	937 min <sup>-1</sup>	
Machining time		60 s	
Electrode current		I <sub>av</sub> = 2.3A	
Coolant		KNO <sub>3</sub> solution	

※ 超音波スピンドル: 多賀電気社製



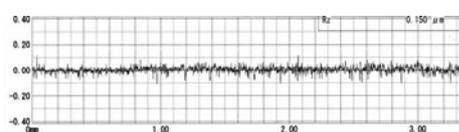
(a) 加工表面(外観)



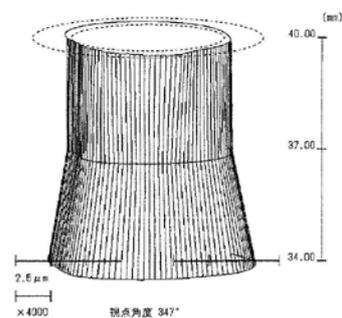
(b) 加工表面 (レーザ顕微鏡、1000倍)

trial#	通常研削	超音波振動研削	超音波・電解ハイブリッド研削
1	1以下	1	5
2	1以下	1	4
3	1以下	2	3
4			3
5			3
6			4
平均	1以下	1.3	3.7※

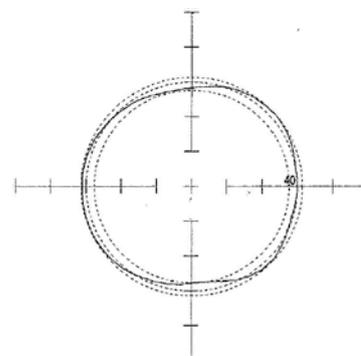
(c) 加工法ごとの工作物除去量



(d) 表面粗さ 0.15 μmRz



(e) 円筒度 2.73 μm



(f) 真円度 0.97 μm

図 2.2.3 超音波電解研削による鏡面加工

### 【電解作用の応答性と安定性の向上】

低電圧高周波パルス電源の導入によりスパーク発生と短絡の抑制を達成したものの、電解反応の応答性と安定性という課題が残った。超音波電解研削サイクル開始から電解反応が始まるまでの時間のばらつきが大きく、仕上がり寸法のばらつきを招いていた。そこで基礎実験により得られたパルス電流が電解反応に与える影響に関する知見に基づき、パルス電流の波形をより高度に制御可能な電解研削専用電源を試作し課題解決を図った。特にパルス波を生成するスイッチング装置は、フィールドテストを繰り返し、部品選定、加工条件の最適化を図って完成に至った。最終的には、内面研削盤の加工プログラムでその電流制御を可能とした。

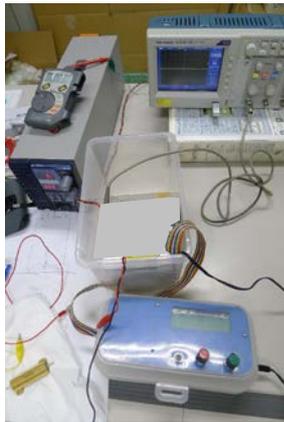
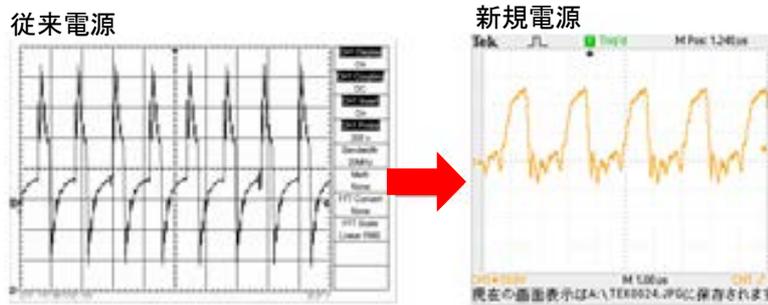
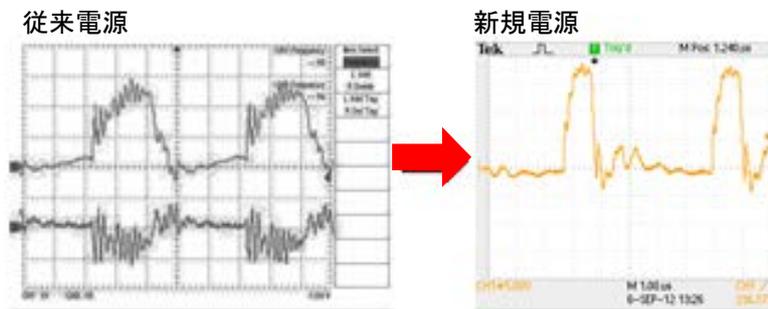


図 2.2.4 スwitchング装置プロトタイプ 図 2.2.5 完成した電解研削用電源(赤丸内)  
(株)マイスター協力



(a) 設定 1 $\mu$ s-ON, 1 $\mu$ s-OFF



(b) 設定 1 $\mu$ s-ON, 1 $\mu$ s-OFF

図 2.2.6 電流パルス波形の比較

表 2.2.2 加工条件

工作物材料	SCM435 (HRC50)	実加工時間	35s
工作物寸法	ID 4.4 x 9.0L	研削抵抗	5~8 N
工作物回転速度	937 min <sup>-1</sup>	超音波振動	50kHz, 6 μm <sub>p-p</sub>
砥石仕様	電着ダイヤモンド#2000 (FSK)	極間電流/電圧	1.7A/12.5V
砥石回転数	4000 min <sup>-1</sup>	電流パルスDUTY比	20% (1 μs-ON-4 μs-OFF)
砥石オシレーション	ストローク 1 mm, 5 Hz	研削液	2wt%-KNO <sub>3</sub> , 2wt%-シミロン

表 2.2.3 加工法ごとの材料除去量<sup>※2</sup>

Trial No.	conv.		+el		+us		+us+el	
	除去量(mg)	表面粗さ(Rz)	除去量(mg)	表面粗さ(Rz)	除去量(mg)	表面粗さ(Rz)	除去量(mg)	表面粗さ(Rz)
1	4.0	0.388	5.4	0.537	9.7	0.484	10.1	0.586
2	4.4	0.372	5.8	0.590	6.6	0.468	10.8	0.529
3	3.1	0.382	6.2	0.431	6.9	0.416	9.2	0.492
4	3.9	0.418	6.4	0.534	9.3	0.548	12.4	0.527
5	4.7	0.500	5.3	0.535	10.5	0.584	11.2	0.677
av.	4.02	0.412	5.82	0.525	8.60	0.500	10.74	0.562
援用効果	0.0		+1.80		+4.58		+6.72 (+5.3%)※	

※かつこ内数値：従来研削を基準にした超音波と電解作用の相乗効果による増加率

※2 conv.: 従来研削、+el: 電解研削、+us: 超音波振動援用研削、+el+us: 超音波電解研削

電解研削専用電源を用いて電解研削を行った結果(表 2.2.3 参照)、電解研削の除去量が従来研削よりほぼ均等に増加していることから、超音波振動を援用しなくても、粒度#2000 の砥石で安定した電解研削が可能となったと判断できる。

さらに、同一加工サイクルでの従来研削、電解研削、超音波援用研削、超音波電解研削による材料除去量を比較すると電解作用と超音波振動の両方を援用することによる相乗効果が見られた。従来研削の除去量の平均値を基準として、電解作用の援用にて+1.80 mg、超音波振動の援用にて+4.58 mg 除去量が増加しているところ、両方を援用することでそれぞれの増加量を上回る除去量が得られている。超音波電解研削条件の最適化を図るために重要な要素であるため、詳細を後述する。

【アスペクト比 10 の内周面の加工】

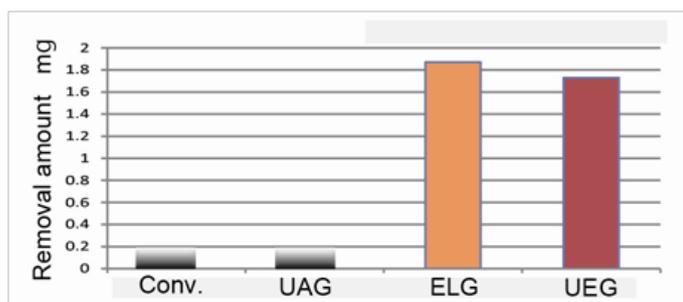
電解専用電源を用いてアスペクト比 10 の内周面をアスペクト比 20 の砥石を用いて内面研削加工を試みた。

表 2.2.4 加工条件

Ultrasonic vibration		Frequency	50 kHz
		Amplitude	8 $\mu\text{m}$ p-p
Grinding wheel	Spec.	Electroplated Diamond (Grit size 10 $\mu\text{m}$ ) OD 0.5 mm, 10 mm long	
	Rotational speed	4000 $\text{min}^{-1}$	
Workpiece	Material	SCM435	
	Size	ID 0.8 mm, 8 mm long	
		Rotational speed	937 $\text{min}^{-1}$
Machining time		65 s	
Electrode current		$I_{\text{av}} = 2 \text{ A}$	
Grinding force		0.7 N	
Coolant		5 wt%-KNO <sub>3</sub> solution	

超音波スピンドル: 多賀電気社製

同じ切込速度、切込ストロークの条件で電解作用の ON/OFF、超音波発生器の ON/OFF を組み合わせ、従来研削、超音波援用研削、電解研削、超音波電解研削の 4 種類の加工法を行い、SCM435 の焼入鋼の  $\phi 0.8$ 、長さ 8 mm の内周面を粒度#2000、直径 0.5 mm、長さ 10 mm の電着ダイヤモンド砥石を用いて加工を行い、その結果を比較する。



Conv.: 従来研削、UAG: 超音波援用研削、ELG: 電解研削、  
UEG: 超音波電解研削、Conv と UAG は 微量により計測不可

図 2.2.7 アスペクト比 10 の SCM435 焼入れ鋼の内面研削

従来研削: 除去量は電子天秤で測定不可能なほど少量だった。また、レーザ顕微鏡で観察したところ工作物表面には切削痕も確認できなかった(図 2.2.9(a),(e)参照)。さらに表面粗さの測定においても研削表面は観察されなかった。従ってこの条件では、材料除去能力はないと判断できる。

超音波援用研削：除去量は、従来研削と同様、電子天秤で測定不可能であったが、工作物表面には部分的ではあるが切削痕が確認できる(図 2.2.9(b),(f)参照)。また、表面粗さの測定においても研削表面を確認した。したがって、材料凸部の形状を修正する程度の材料除去能力はありと判断する。

電解研削：除去量は約 2 mg、直径に換算すると 24  $\mu\text{m}$  相当を除去している。加工中、内周面から気泡発生があり、電解反応を確認(図 2.2.8 参照)。工作物表面は 19.4  $\mu\text{mRmax}$ (断面曲線)。材料除去能力はあるが、大きな凹凸が形成されており(図 2.2.9 (c),(g)参照)、ほとんどが電解作用のみで除去していると判断する。

超音波電解研削：除去量は電解研削とほぼ同じだが、表面粗さは 3.9  $\mu\text{mRmax}$ 、断面曲線で見ると加工表面の大きな凹凸は無く、真直度の良化を確認した(図 2.2.9 (d),(h)参照)。

この結果より、従来研削では不可能であった高アスペクト小径内周面の加工を、超音波振動と電解作用の両方を援用することにより、高能率・高精度な加工が可能になったと判断する。

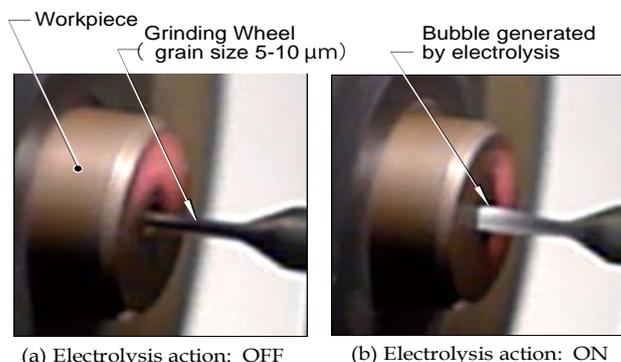


図 2.2.8 アスペクト比 10 の内周面の超音波電解研

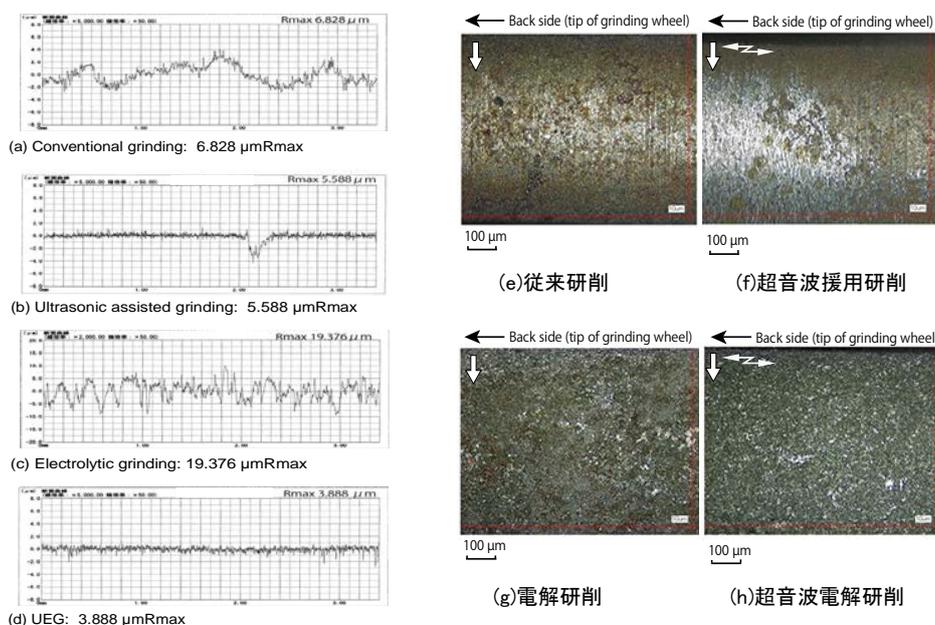


図 2.2.9 アスペクト比 10 の内周加工面

## 【超音波振動と電解作用の相乗効果のメカニズム】

### 溝付き CBN 砥石による検証

従来の内面研削加工に超音波振動を援用による材料除去量の増加量を A とする。また、従来の内面研削加工に電解作用の援用による材料除去量の増加量を B とする。そして従来の内面研削加工に超音波振動と電解作用の両方の援用による材料除去量の増加量を C とする。粒度#325～#2000 のダイヤモンド砥粒の電着砥石を用いて超音波電解研削を行うと、常に  $A + B < C$  となる結果を得ていた。超音波電解研削の加工効率の最大化を図るため、このメカニズムの解明を試みた。

最初に直径 3 mm の超硬軸付きビトリファイドボンド CBN 砥石の直径 4 mm の外周面に幅 0.5 mm、深さ(電極間距離)0.5 mm の斜溝加工を施し、溝底面に超硬を露出させ、総面積 4 mm<sup>2</sup> の電極を有する砥石を製作した(図 2.2.11)参照)。そこで、粒度#600(電極間距離約 0.01 mm)の電着ダイヤモンド砥石とこの溝付き CBN 砥石を用いて電解作用と超音波振動の相乗効果を比較した。

その結果、超音波振動と電解作用の相乗効果は、電着ダイヤモンド砥石を用いた場合にのみ確認できた。

表 2.2.5 電着砥石を用いた超音波電解研削の実験条件

工作物材料	SUS440C (50HRC)	実加工時間	60 s
工作物寸法	ID 4.4 x 9.0L	超音波振動	51 kHz, 6.5 μm <sub>p-p</sub>
工作物回転数	1000 min <sup>-1</sup>	電極間電流	1.9A (DUTY 比:100%)
砥粒の仕様 (粒度)	ダイヤモンド (#600)	研削液	5wt%-KNO <sub>3</sub>
砥石回転数	4000 min <sup>-1</sup>	加工面の表面粗さ	0.7~0.8 μmRz
砥石オシレーション	ストローク 1 mm, 5 Hz		

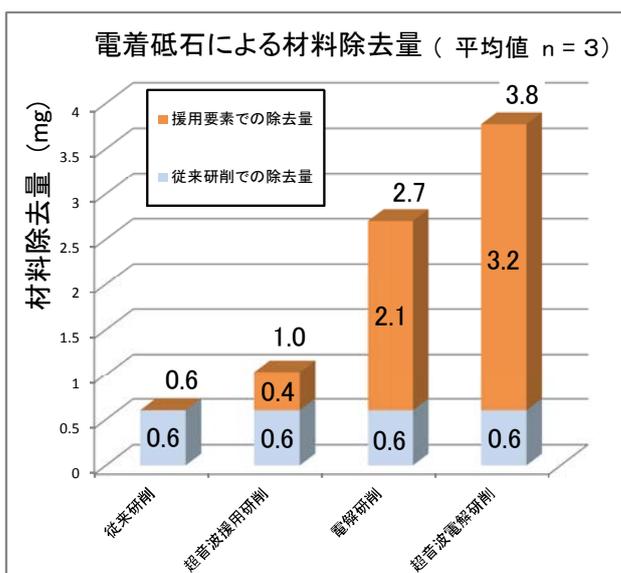


図 2.2.10 電着砥石による超音波振動と電解作用との相乗効果

超音波振動の援用効果: 0.4 mg  
 電解作用の援用効果: 2.1 mg  
 超音波電解研削の援用効果: 3.2 mg  
 単独要素の援用による増加量の合計の 1.28 倍



図 2.2.11 電着砥石

表 2.2.6 溝付き CBN 砥石を用いた超音波電解研削の実験条件

工作物材料	SUS440C (50HRC)	実加工時間	25 s
工作物寸法	内径 4.4 長さ 9.0 mm	超音波振動	51 kHz, 6.5 $\mu\text{m}_{\text{p-p}}$
工作物回転数	1000 $\text{min}^{-1}$	電極間電流/電圧	1.9A (DUTY 比:100%)
砥粒の仕様 (粒度)	CBN (#325)	研削液	5 wt%- $\text{KNO}_3$
砥石回転数	4000 $\text{min}^{-1}$	加工面の表面粗さ	0.75~0.85 $\mu\text{mRz}$
砥石オンレーション	ストローク 1 mm, 5 Hz		

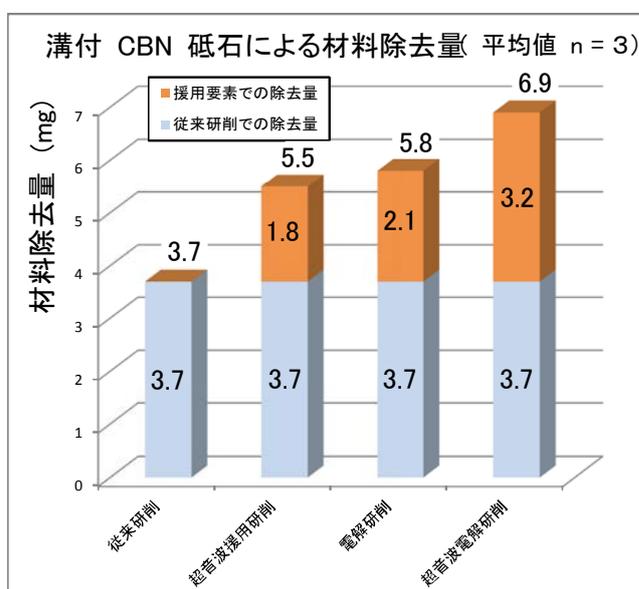


図 2.2.12 溝付き砥石による超音波振動と電解作用との相乗効果

超音波振動の援用効果: 1.8 mg  
 電解作用の援用効果: 2.1 mg  
 超音波電解研削の援用効果: 3.2 mg  
 単独要素の援用による増加量の合計の  
 0.82 倍



図 2.2.13 溝付き CBN 砥石

超音波振動を援用することで電解研削時の加工点がどのように変化するか、倍率 100 倍のマイクロスコープを用いたビデオ撮影による観察を行った。

最初に、超音波振動による電極間の消泡効果を確認した。超音波振動により電解で発生した泡を微小にすることで、狭い電極間での電解反応を安定、および促進させる可能性があると考えする。(図 2.2.14 参照)

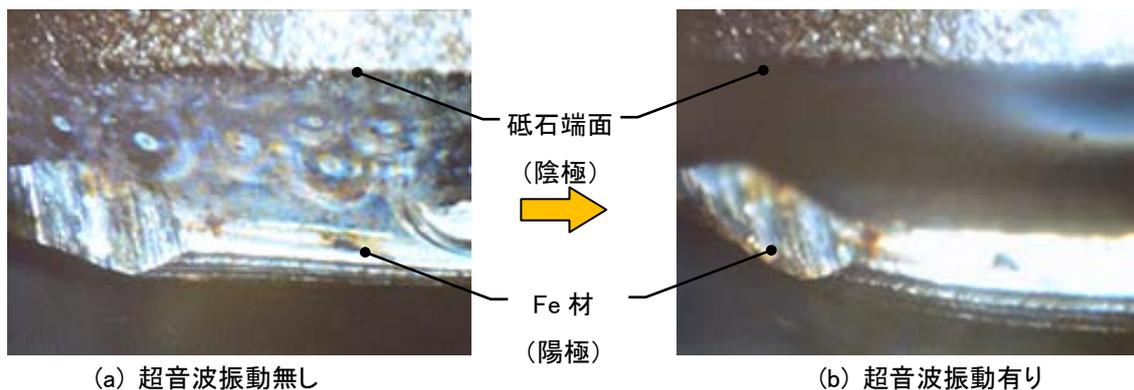
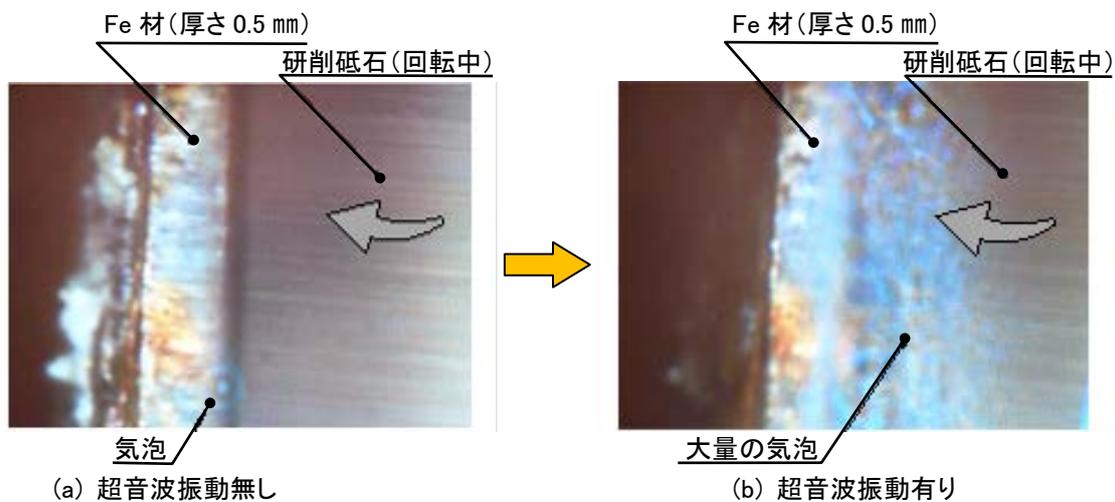


図 2.2.14 超音波振動による消泡効果

電解液: 5 wt%-  $\text{KNO}_3$  溶液、電極間距離: 0.5 mm

次に、電着ダイヤモンド砥石#600の外周面で0.5 mm厚のFe材を電解研削し、その後、砥石に超音波振動を伝搬させたときの加工点の変化を観察する(図 2.2.15 参照)



電解液:  $\text{KNO}_3$  溶液(砥石に滴下)

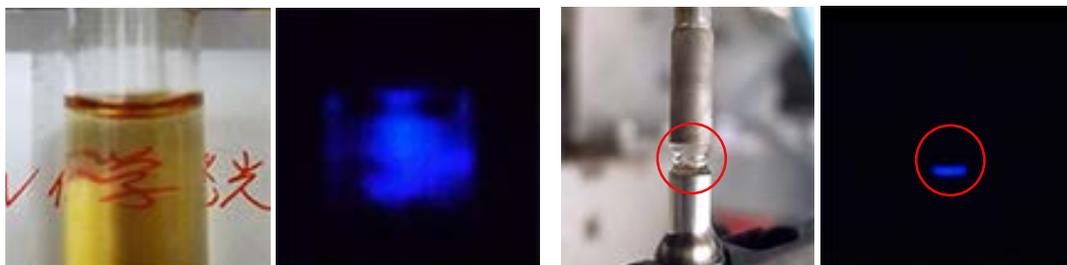
電極間距離(砥粒突出し高さ): 0.01 mm

図 2.2.15 超音波振動による電解促進

#### 【ルミノール化学発光による観察】

次に、超音波振動の化学的作用を検証した。電解研削時の陽極では、工作物である表面の鉄が  $\text{Fe}^{2+}$  とイオン化し、そこに水の電気分解により生成されたヒドロキシイオン ( $\text{OH}^-$ ) と結合し、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$  となり除去される。以前より超音波化学(ソノケミストリー)の分野では、超音波振動によって発生したキャビテーション圧壊の衝撃により水分子が分解され、強い酸化作用を持つヒドロキシ

ラジカル(OH $\cdot$ )等の活性酸素が発生するという報告がある<sup>10)</sup>。そこで OH $\cdot$ や活性酸素と反応して化学発光するルミノール溶液を作り、超音波振動を伝搬した砥石が及ぼす化学的影響を検証した<sup>11)</sup>。最初に 2%の過酸化水素水の滴下と電解作用によりルミノール溶液が発光することを確認した。



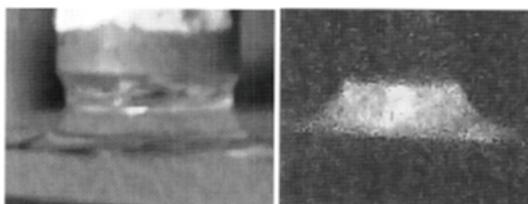
(a) 試験管に入れたルミノール溶液 (b) 2 wt%-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 滴下により発光 (c) 電極間に満たしたルミノール溶液 (d) 通電により発光

過酸化水素(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)のOH $\cdot$ と反応

図 2.2.16 過酸化水素水によるルミノール発光

水が分解して発生したOH $\cdot$ と反応し発光

図 2.2.17 電解作用によるルミノール発光

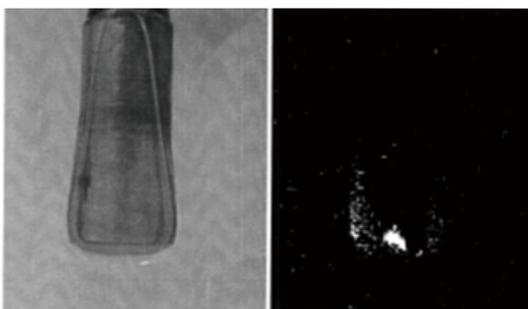


(a) 砥石端面とガラス板 (b) 発光を確認

図 2.2.18 超音波振動によるルミノール発光

左: 照明あり 右: 照明なし

過酸化水素水の滴下や電解よりも微弱だが発光を確認。



(c) 砥石外周面とガラス板 (砥石先端部ガラスと接触) (d) 接触部付近で発光

撮影機器: Panasonic DMC-LX-5

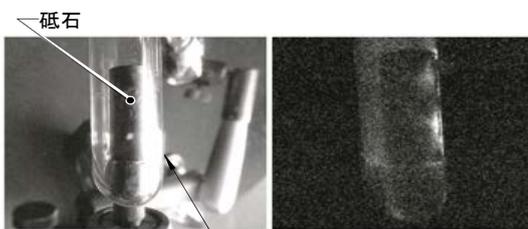
感度: ISO12800

シャッター開放時間: 8 s

(a),(b) 軸方向の超音波振動によりキャビテーションが発生しやすい砥石端面付近で比較的強い発光を確認

(c),(d) ガラス板を傾け、先端をガラス板に接触。両者の隙間が狭い部分ほど発光が強い

(e),(f)ルミノール溶液を充填したガラス管(内径約 6 mm)に砥石(外径 4.4 mm)を挿入。砥石外周面とガラス管内壁との接触面で発光が強い



(e) 砥石外周面とガラス管 (f) 砥石外周面で発光

### 【相乗効果のメカニズムのまとめ】

溝付 CBN 砥石と電着砥石を用いた実験から、電着砥石のみ、超音波振動と電解作用の相乗効果を確認した。またルミノール溶液による観察からは、超音波振動が伝搬された砥石とより接近している物体との間隙でキャビテーションが発生しやすいことが確認した。これらの結果より、電着砥石のような電極間が狭い砥石に超音波振動が伝搬させると、砥石外周面と工作物の間にヒドロキシイオン、またはヒドロキシラジカルが発生し、それにより工作物の鉄イオンとの結合反応が促進されると考察できる。現時点では、これまで検証したどの作用がどの程度の効果をもたらすか定量的な検証は実施していないが、超音波振動は電解研削において物理的效果のみならず、化学的效果も与えている可能性は高い。

また、さらにもう一つの相乗効果をもたらす可能性として電極間のプラズマ発光を観察した。印加電圧を一定以上高くすると電極間にアークが発生し、工作物表面にピットを作るが、プラズマの発生では加工面への悪影響はなかった。電解液に超音波振動を伝搬することで水中プラズマの発生を促し、またそのプラズマがヒドロキシラジカルを発生させることが知られており<sup>12),13)</sup>、この現象においても超音波振動は電解研削に有利に作用すると考察する。



(a) プラズマ発光



(b)アーク

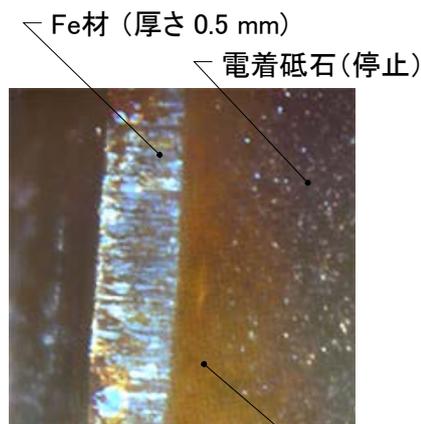
図 2.2.19 電極間に発生するプラズマとアーク

上: 超音波振動を伝搬させた砥石

下: Fe 材

電極間距離: 0.5 mm

電解液: 5 wt%-KNO<sub>3</sub>



赤色のプラズマ発光

図 2.2.20 砥石外周面発生したプラズマ  
電圧を印加した電着砥石#600 と Fe 材を接触させ砥石に超音波振動を伝搬した直後に発光を確認

## 2-2-2 クーラントスルー型超音波電解スピンドルの開発とその性能評価

自動車エンジンの燃料噴射バルブのような深穴小径の止まり穴の高精度・高能率研削をするには、砥石先端から研削点にクーラントを供給する必要がある。そのためには、砥石スピンドルにセンターホール(貫通穴)を設けたクーラントスルー型の砥石スピンドルを用いて加工するのが一般的である。そこで、深穴小径の止まり穴、特にその最深部に位置する内周面、または円錐面を、従来以上の高精度・高能率研削を実現するために、クーラントスルー型超音波電解スピンドルを試作した(図 2.2.21 参照)。

本スピンドルの構造は、クーラント用の回転継手をスピンドルシャフト後方に取り付け、同シャフト先端内部に、超音波振動子(ボルト締めランジュバン型振動子)を組込み、その先に振幅拡大ホーン、クイル、そしてねじ締結式砥石が連結する。これらの部品すべてにセンターホールを加工し、各接合部に漏水対策を施した。さらに電解研削用の給電装置をスピンドル後方に設け、砥石先端への通電を可能とし、超音波電解研削を可能にした(図 2.2.22 参照)。

表 2.2.7 仕様一覧

最高回転速度	5,000min <sup>-1</sup>
振動振幅	10 μ m <sub>p-p</sub>
振動周波数	44kHz
振動方向	軸方向
最大超音波出力	45W
砥石チャック	ネジ締結方式
スピンドル外径	φ 90
全長	400mm
質量	8kg



図 2.2.21 クーラントスルー型超音波電解スピンドル



図 2.2.22 シート面の超音波電解研削

### 【研削実験と成果】

深さ 30 mm の内周径約 4 mm の円錐面加工を想定した貫通穴付きクイルとテストピースを用意して、砥石先端の円錐面で超音波電解研削加工を行った。

超音波振動と電解研削の有無による 4 通りの組合せで実験を行い、従来研削と比較して、研削代がどのように変化するかを調査した。図 2.2.23 に、シート面の超音波・電解研削条件とその実験結果を示す。この実験により従来の方法と比較して、超音波振動と電解研削の両方を援用した場合は、研削効率は最も高くなり、研削代は 2.6 倍に増加した。続いて超音波振動だけを援用した場合は、研削代が 2.2 倍まで増え、こちらも高能率となった。一方、電解研削においては、従来の研削とほぼ同じ能率にとどまった。

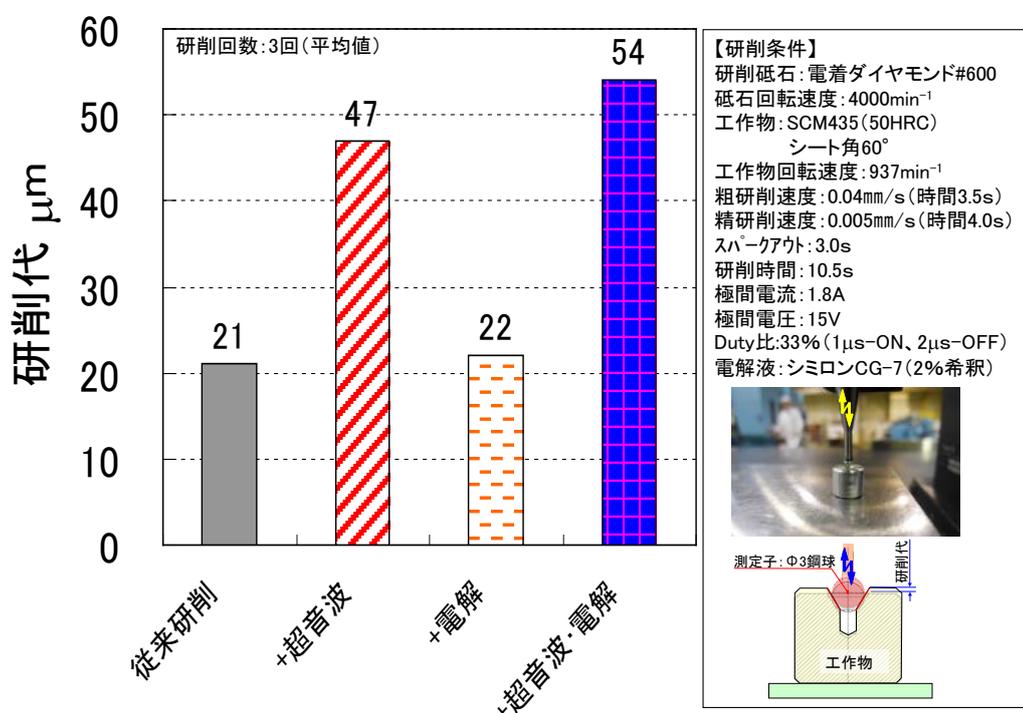


図 2.2.23 シート面の超音波電解研削結果

ここで研削後の工作物表面を SEM で観察した像を図 2.2.24 に示す。電解研削後の表面では、単純なストレートの研削痕の重畳であるのに対し、超音波電解ハイブリット研削後の表面では、ほぼ規則的な波模様の切削痕の重畳により全く異なるテクスチャーの加工表面が得られた。現段階では同スピンドルによる明確なパターンによるテクスチャーを仕上げるための実験は不十分であるが、機能性表面の創成は十分可能であると判断する。

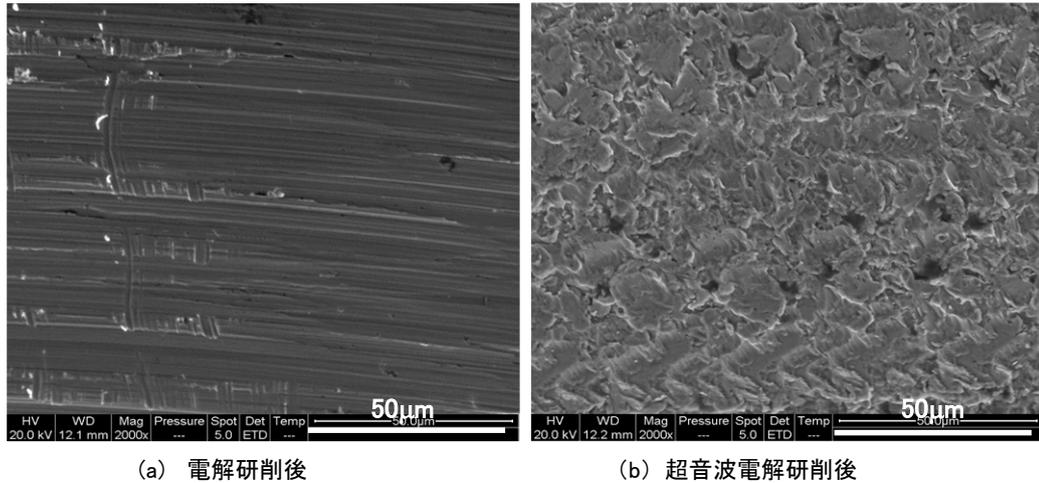


図 2.2.24 研削後の工作物表面 SEM 像

【まとめ】

新たに試作した電解研削専用電源を用いることで粒度#2000 の電着ダイヤモンド砥石による安定した電解研削が可能となった。また、従来研削では不可能だったアスペクト比 10 の小径内周面加工を超音波電解研削により可能とした。また狭い電極間距離においては、超音波振動と電解作用の援用による相乗効果が現れることを確認した。この相乗効果には物理的作用に加えて化学的作用も影響している可能性を示唆する観察結果も得られた。

## 第3章 全体総括

本研究では超音波振動を伝搬した砥粒運動の理論解析により内周面研削の高能率・高精度化への道筋を立て、内面研削用超音波スピンドルの製作を行った。さらにその加工理論を展開させ、3D 超音波援用加工機を用いて加工表面のテクスチャーをコントロールし、あらたな高付加価値加工をもたらすと考える機能性表面の創成を行った。さらに、電解研削専用電源、クーラントスルー型超音波電解スピンドルを試作し、組み合わせ超音波電解加工装置を開発した。この装置を用いることで、深穴小径の止まり穴の高能率・高精度加工が可能となった。

### 超音波振動を援用した内面研削加工の確立

#### 2-1-1 超音波振動加工理論に基づく加工条件の最適化と超音波スピンドルの最適仕様の構築

統計的手法を用いた理論解析手法により振動研削全般に関して理論解析を可能とし、実験によりその整合性を確認した。その結果、内面研削への超音波振動の援用により加工能率、および加工精度を向上させるための内面研削用超音波スピンドルの仕様を決定した。

#### 2-1-2 超音波振動加工理論に基づくマイクロ工具設計と機能性表面の創成実験

軸振動1軸+たわみ振動2軸の超音波振動を発生する 3D 超音波援用加工機を開発し、高速カメラにより、振動状態を観察しながら加工を行なった結果、理論通りのピッチの構造が創成されることを確認した。さらに単粒ダイヤモンド砥石を開発し、伝搬する超音波振動の条件と微細構造創成の規則性を明らかにした。

#### 2-1-3 内面研削用超音波スピンドルの試作

ラジアル剛性を強化させたビルトインモータ型の内面研削用超音波スピンドルを試作した。周波数 40 kHz、振幅  $10 \mu\text{m}_{p-p}$  の超音波振動の砥石への伝搬を確認した。この条件の超音波振動の援用により、加工後の表面粗さ精度が  $0.6 \mu\text{mRz}$  から  $0.5 \mu\text{mRz}$  に向上することが確認できた。最高回転速度に関しては、当初の目標の  $50000 \text{ min}^{-1}$  には到達できなかったが、今後さらなる改良を加えることで実用化をめざす。

#### 2-1-4 超音波援用効果の最大化とその検証

デジタル通信により NC 装置へのフィードバックが可能な動力計を開発した。研削抵抗により砥石切込みスライドをフィードバック制御する定圧研削法を構築した。それにより、高い超音波援用効果を維持しながら内周面の超音波援用研削を行ない、同一研削代の加工時間が従来研削と比較して5分の1以下になることを確認した。

## 超音波電解ハイブリッド内面研削盤の開発

### 2-2-1 電解研削専用電源の試作とその性能評価

電解研削専用電源を用いる以前は、粒度#2000 の電着ダイヤモンド砥石による電解研削は不可能であり、砥石に超音波振動を伝搬させることにより不安定ながらも電解研削を可能としていた。電解研削専用電源を試作し、これまでの電流パルスの矩形波の鈍りを改善させ、超音波振動を援用しなくても粒度#2000 の電着ダイヤモンド砥石を用いた安定した電解研削が可能となった。さらに超音波援用と電解作用の両作用による相乗効果も確認した。

### 2-2-2 クーラントスルー型超音波スピンドルの開発とその性能評価

クーラントスルー型超音波スピンドルを製作し、深さ 30 mm、直径 4 mm の止まり穴内周面における超音波電解研削を可能とし、従来研削に対して約2倍以上の効率で加工できることを確認した。懸念していた貫通穴を有する小径砥石ねじ締結部においても超音波振動の伝達効率の低下も認められず、実用の可能性を確認した。

## 謝辞

本研究開発事業に参画いただき、共同研究をさせていただいた国立大学法人東北大学 大学院工学研究科 厨川研究室の研究者各位、ならびに、アドバイザーとして計画の遂行にご支援をいただいた、山形県工業技術センター、株式会社マイスター、ジャスト株式会社の技術担当各位のご指導、ご協力により、本研究の目標を無事達成できましたことに深く御礼申し上げます。

さらに本事業推進の機会を与えていただいた東北経済産業局関係各位に深甚なる感謝をいたします。

## 参考文献

- 1) Norikazu SUZUKI, Zhenmin YAN, Makoto HARITANI, Ji-bin YANG, Seiji HAMADA, Rei HINO, and Eiji SHAMOTO: Ultraprecision Machining of Tungsten Alloy by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, Journal of the Japan Society for Precision Engineering Vol.73, No.3, 2007
- 2) Masahiko JIN, Hidenari KANAI, and Mitsuru KODAMA: Development of Ultrasonic Spindle for Machine Tool and Evaluation of Cutting Performance, IEICE Technical Report US2010-88 (2010-12)
- 3) Keita SHIMADA, Takumi TATEISHI, Nobuhito YOSHIHARA, Jiwang YAN, and Tsunemoto KURIYAGAWA: Ultrasonic-assisted micron-grinding with electroplated diamond wheels, Journal of Society for Abrasive Technology Vol. 53 No.1 2009 JAN. 45-48
- 4) Mitsuyoshi NOMURA, Yongbo WU, Masana KATO, Toru TACHIBANA, Tsunemoto KURIYAGAWA: Study of internal ultrasonic vibration assisted grinding of small bore -Mechanism of grinding force reduction due to ultrasonic vibration-, Journal of Society for Abrasive Technology Vol. 49 No.12 2005 DEC. 691-696
- 5) 辻井 薫: 微細フラクタル構造による超撥水性の発現, 砥粒加工学会誌, 50, 4 (2008) 185-188.6) 前納 良昭: 微細表面形状による光学機能形成について-反射防止機能-, 砥粒加工学会誌, 50, 4 (2008) 181-184.7) 榊田 正美: 微細表面テクスチ

ヤによる表面機能の形成, 砥粒加工学会誌, 50, 4 (2008) 173-1768) 久米原 宏之, 森 昌幹: 超音波振動系におけるねじ結合部に関する研究 - 締結性能に及ぼす座面形状精度の影響, 精密機械 48 巻 8 号(1982.8)

9) 佐藤 健児: 電解研削の理論と応用, 機械工作 Vol.12, No 83 (1965.5)

10) 安田 啓司: 超音波による化学物質の分解と超音波反応器の開発, THE CHEMICAL TIMES 2009 No.2

11) 金 継業, 桑田 宏明, 高橋 史樹, 鈴木 保任: 電気化学発光プローブによる超音波反応場のキャラクタリゼーション, BUNSEKI KAGAKU Vol. 59, No. 1, pp.51-56 (2010), © 2010 The Japan Society for Analytical Chemistry

12) 飯田 康夫: ソノプロセス -超音波化学の応用-, 化学工学 第 72 巻 第 11 号(2008)

13) 香田 忍: ソノケミストリーからソノプロセスへ, 化学工学 第 67 巻 第 2 号(2003)