平成 27 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「難削材の高精度・高能率加工と機能性インターフェース 創成を可能とする高周波パルス電流・超音波振動援用 プラズマ放電研削装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成 28 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

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の目的	1
1-2 研究開発の概要	1
1-3 研究開発の目標	2
1-3-1 UPD 研削加工装置の製作(ミクロン精密株式会社、国立大学法人東北大学大学	≌院、山
形県工業技術センター)	2
a) UPD 研削専用通液型超音波スピンドルの製作	3
b) UPD 研削専用工具の製作	3
1-3-2 超音波振動援用研削、プラズマ放電加工の同時加工である UPD 研削による難	削材加
工技術の構築(山形県工業技術センター、株式会社カナック、公立大学法人秋田	3県立大
学、ミクロン精密株式会社)	3
a) チタン合金加工の高精度・高能率化	4
b) 超硬合金の微細加工への応用	4
c) チタン、ニッケル基合金の高精度形状加工への応用	4
1-3-3 機能性インターフェース創成(国立大学法人東北大学大学院、山形県工業技術	テセンター
ミクロン精密株式会社)	5
1-4 研究体制	6
1-4-1 研究組織及び管理体制	6
a) 研究組織(全体)	6
b) 管理体制	7
1-4-2 研究員及び管理員	7
a) 研究員	8
b) 管理員	8
c) 所在地	10
第2章 本論	11
2-1 UPD 研削加工装置の製作	11
2-1-1 液中でのプラズマ発生条件	13
2-1-2 加工液へのマイクロバブル混入効果	14
2-1-3 チタン合金の高精度研削加工	16
2-1-4 UPD 研削における高周波パルス電流の効果	17
a) UPD 研削による加工表面の改質効果	18
b) UPD 研削専用通液型超音波スピンドルと焼結チタンボンド CBN 砥石による UPD	ヘリカル
研削への試み	19
2-1-5 モデル超音波放電スピンドルの開発	21
2-1-6 UPD 研削用通液型超音波スピンドルの開発	22
2-1-7 まとめ	24
2-2 難削材加工への対応	25

2-2-1 UPD 研削用工具の製作	26
2-2-2 エロージョン特性, エッチング特性に優れた工具の製作	26
a) 耐キャビテーション特性	26
b) 耐プラズマ特性	26
c) チタンドープ特性	26
d) キャビテーション特性・耐プラズマ特性	26
2-2-3 超硬合金の溝加工への対応	29
2-3 チタン合金、ニッケル基合金の超音波振動援用プラズマ放電研削の基礎加工特性	34
2-3-1 はじめに	34
2-3-2 UPD 研削システム	34
2-3-3 電解やプラズマ放電なしでの超音波援用研削	36
2-3-4 炭素鋼(S45C)の酸化現象調査	37
2-3-5 チタン合金の側面 UPD 研削の基礎特性	38
2-3-6 UPD 研削によるチタン合金の溝加工	42
2-3-7 まとめ	43
2-4 機能性インターフェース創成	45
2-4-1 放電表面処理による加工面評価	45
a) 放電表面処理方法	45
b) 単発放電痕解析	46
c) 鋳鉄基材への放電処理面の評価	48
2-4-2 まとめ	49
第3章全体総括	50
3-1 研究開発成果	50
3-1-1 ミクロン精密株式会社	50
3-1-2 株式会社カナック・山形県工業技術センター	51
3-1-3 公立大学法人秋田県立大学 呉研究室	52
3-1-4 国立大学法人東北大学大学院 厨川研究室	52
3-2 謝辞	53

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の目的

最近、国内製造業においては製品の高機能化傾向が高まり、軽量・高強度、高耐熱性、耐摩 耗性を有する素材を用いた部品加工のニーズが年々増加している。そこで、従来切削技術では 対応できない難削材において、高周波パルス電流と超音波振動を援用したプラズマ放電により加 工面の機械的特性変化による難削材の快削化、さらに低強度材においては、高強度化加工を可 能とし、それらのニーズを量産化対応も含めて解決を図る。

超音波振動を援用させた電極工具(砥石)と工作物間に、高周波パルス電源により電圧を印加 し、その極間にプラズマ状態を作り、生成したフリーラジカル、イオンなどにより工作物表面を改質 させて加工を施す、高周波パルス電流・超音波振動援用プラズマ放電研削(Ultrasonic assisted Plasma Discharge Grinding,以下 UPD 研削)装置の開発を行う。それにより以下の加工を可能に する。

①難削材の快削化加工: 加工表面と工具が接触した部分を選択的に軟質化させて低加工圧 で研削する高能率・高精度形状加工。

②低強度材の改質化加工: 高い形状加工を施したのち、加工表面に炭素、または珪素をドー プしながら加工表面を硬質化させ、同時に表面粗さ精度を高める低摩擦・耐摩耗表面創成加工。



図 1-1-1 難削材の快削化



図 1-1-2 難削材の硬質化

1-2 研究開発の概要

平成25年度に行ったUPD研削による難削材の加工基礎テストとして、超音波振動援用研削に よる超硬合金、チタン合金、ニッケル基合金の加工テストを実施し、難削材加工における超音波 援用効果を確認した。さらに超音波援用による加工液の流動性変化の確認、また放電による加 工面へのドーピングテストにより硬化層が生成されることを確認した。これらの実験結果をもとに、 平成26年度は、平成25年度に購入した3軸制御型デスクトップ加工機に、平成25年度に製作 したUPD研削専用電源装置、そして加工液供給装置を搭載し、既存の超音波スピンドルを用い て UPD 研削加工装置を試作し、UPD 研削加工テストを実施した。同装置にて超硬合金、チタン合金、ニッケル基合金の微細加工を実施し、従来の研削加工や放電加工では不可能であった高精度・高能率加工を実施した。同時に UPD 研削専用通液型超音波スピンドルの製作を実施、平成26 年度末に3 軸制御型デスクトップ加工機に搭載し、チタンの超音波放電加工テストを行った。

平成26年度後半から、表面改質テストのデータをもとに、機能性インターフェース創成に特化したモデル超音波放電スピンドルの製作を始め、平成26年度に完成。平成27年度に同制御装置を製作し、モデル超音波放電スピンドルユニットを完成させ、UPD研削による機能性インターフェース創成を具現化させる。

平成 25 年度に購入した加工液供給装置に表面改質を促進させるガスをマイクロバブルの状態 で砥石と工作物の間に供給し、超音波振動や高周波パルス電流を与えプラズマ状態を作り、加 工表面の改質を図る。その様子を平成 25 年度に購入した走査型電子顕微鏡や非接触薄膜・厚 膜干渉測定機用レンズを用いて観察し、研削加工への相乗効果、および加工表面の高付加価値 化への加工条件の最適化を行う。また、同時に UPD 研削専用工具の開発を行う。目標としては、 UPD 研削における高能率化、かつ工具の長寿命化を可能にする工具の製作であり、超硬合金に 幅 0.5 mm、深さ 0.5 mm の溝加工を従来の放電加工と比較し加工速度 2 倍を可能とする砥石の 製作を目指す。もう一つの目標は、加工表面を狙い通りに改質させ、材料の快削化や硬質化を実 現するドープ材料をその砥石母材に混入した砥石を製作する。

これらの要素技術や加工装置の開発により、ミクロン精密株式会社製造の複合加工機等をベ ース機として、超硬工具、超硬治具、超硬金型など、工具業界や金型業界向け、またチタン材料 を用いた医療機器、医療用工具など、医療機器業界向けの専用加工機としての実用化を図る。

1-3 研究開発の目標

1-3-1 UPD 研削加工装置の製作(ミクロン精密株式会社、国立大学法人東北大学大学院、山 形県工業技術センター)

平成 25 年度は、購入した 3 軸制御型デスクトップ加工機、UPD 研削専用電源装置、加工液供 給装置、そして既存の超音波スピンドルを用いて、超音波振動する電極と工作物間を観察しなが ら、電極間距離や印加電圧を変化させ、プラズマ放電の微細化や安定化への影響を調査した。

平成 26 年度は、平成 25 年度に購入した 3 軸制御型デスクトップ加工機をベースマシンに、同じ く平成 25 年度に購入した加工液供給装置、UPD 研削専用電源装置を搭載して、UPD 研削加工 装置を試作(ミクロン精密株式会社)し、超硬合金やチタン合金の UPD 研削の加工テストを実施し た。電極砥石への超音波振動の伝搬と、電極間の高周波パルス電流により、プラズマ放電を微 細化、安定化させ、良好な加工面を確保しながら、砥石摩耗も抑えられることを確認した。

平成 27 年度は、これまでの加工データを踏まえて実用化対応可能な UPD 研削専用通液型超 音波スピンドルを完成させ、さらに機能性インターフェース創成のための UPD 研削専用工具を取 り付けて UPD 研削加工装置を完成させる。(ミクロン精密株式会社) チタン合金や超硬合金の安定した UPD 研削を可能にするため、放電による工作物への異種元素のドーピングによる表面改質の状態を調査する。併せて、被削性の高い材料の高硬度化、高機能化を重点的に実施する。(国立大学法人東北大学大学院、山形県工業技術センター)

a) UPD 研削専用通液型超音波スピンドルの製作

・平成26年度に超音波振動子、給電トランスの動作確認を終了したUPD研削専用通液型超音 波スピンドルに対して、ビルトインモータを採用し、振動を安定化させ、さらに冷却構造を設け、加 工時、室温+20℃以下に昇温抑制を図る。最終的には回転バランスの調整、連続8時間稼働時 での通液試験を実施し、市販可能なレベルに作り込む。(ミクロン精密株式会社)

・UPD 研削専用通液型超音波スピンドルに UPD 研削専用工具を取り付け、超音波振動の共振 周波数を調整する。(ミクロン精密株式会社)

・難削材のテスト加工による実用試験で評価を行い、設計の妥当性を検討する。(ミクロン精密 株式会社)

b) UPD 研削専用工具の製作

・平成25年度実施の②-1 UPD研削専用工具の開発(山形県工業技術センター)を応用し、 平成26年度に試作した焼結チタンボンドのダイヤモンド砥石をモデル超音波放電スピンドル、 UPD研削専用通液型超音波スピンドルに取り付け、プラズマ放電加工を行う。(国立大学法人東 北大学大学院、山形県工業技術センター、ミクロン精密株式会社)

・プラズマ放電加工を行い、加工表面の改質状態を観察しながら、焼結チタンボンドに混合する 元素、その混合比率、耐久性もパラメータに加え、製作を行う。(山形県工業技術センター、ミクロ ン精密株式会社)

1-3-2 超音波振動援用研削、プラズマ放電加工の同時加工である UPD 研削による難削材加 工技術の構築(山形県工業技術センター、株式会社カナック、公立大学法人秋田県立大学、ミ クロン精密株式会社)

平成 25 年度に超硬合金、ニッケル基合金、チタン合金の放電加工や超音波援用加工の基礎 テストによりデータを収集した。(山形県工業技術センター、株式会社カナック、公立大学法人秋 田県立大学、ミクロン精密株式会社)

平成 26 年度は、収集した基礎データをもとに、直径 0.5~4mmの砥石を用いた UPD 研削にて 超硬合金、チタン合金のテスト加工を実施し、従来研削と比較し、加工効率や加工表面の改質を 確認した。

平成 27 年度は、超硬合金、チタン合金、ニッケル基合金の加工精度、加工能率の向上をめざ し最適条件を追求する。同時に加工表面の改質の状態、例えば難削材の仕上がり加工表面にお ける耐摩耗性向上を評価する。 a) チタン合金加工の高精度・高能率化

・平成25年度に実施したチタン合金の超音波援用研削加エテスト(公立大学法人秋田県立大学)、また、タングステン、チタン、またはケイ素の電極で行ったプラズマ放電加工(国立大学法人 東北大学大学院)をもとにUPD研削加工の加工条件を予測し設定範囲を確立した。(ミクロン精 密株式会社)

・平成26年度はチタン合金のUPD研削において、超音波振動の援用による加工効率の向上、 UPD研削専用電源装置の高周波パルス電流によるプラズマ放電の安定性向上、さらに加工液へ の添加剤混合が加工精度に変化をもたらすことも確認した。(ミクロン精密株式会社)

・平成27年度は、これまで確認した加工精度への影響が大きいパラメータを重点的に調査、検証し、チタン合金の高精度・高能率研削を実現する。(ミクロン精密株式会社)

b) 超硬合金の微細加工への応用

・平成25年度に実施した幅0.5mmの超音波援用溝研削加エテストの結果を踏まえて、UPD研削加工の条件を設定した。(株式会社カナック、山形県工業技術センター)

・平成26年度は、同じ超硬合金の溝加工を加工液に浸漬した状態でUPD研削加工し、超音波援用溝研削加工テスト結果の2倍以上の加工効率を確保するに至った。(株式会社カナック、山形県工業技術センター)

・平成 27 年度は、幅 0.5mm、深さ 0.5mm の溝加工を従来放電加工工程の 2 分の 1 の時間で 加工するための工具材料の選定と最適加工条件を調査、検証を行う。(株式会社カナック、山形 県工業技術センター)

c) チタン、ニッケル基合金の高精度形状加工への応用

・平成25年度に実施した、チタン合金、ニッケル基合金の従来研削加工と超音波振動援用研 削の比較を行った。(公立大学法人秋田県立大学)

・平成26年度は、難削材の材料特性を解析し、超音波振動を用いた機械加工と高周波パルス 電流を用いた電気加工の複合化からUPD研削加工へ展開、元素分析により、加工表面の改質 を確認した。(公立大学法人秋田県立大学)

・平成 27 年度は、放電加工面の元素分析を基礎に、ニッケル基合金のプラズマ放電加工によ り改質した加工表面の評価を行いながら、プラズマ放電の条件により加工表面がどのように変化 するかを確認した上で、ニッケル基合金の UPD 研削加工実験により、同材料に対する高精度、高 能率加工を実現すると同時に、機能性インターフェース創成により高付加価値をもたらす、ドーピ ング元素の選定を行ない、そのデータに基づき UPD 研削専用工具の製作につなげていく。(公立 大学法人秋田県立大学、山形県工業技術センター、ミクロン精密株式会社)

・平成 27 年度は、チタン合金、ニッケル基合金を直径 0.5~4mm の砥石を用いて、従来研削の 加工効率の 2 倍で微細加工を行う。(公立大学法人秋田県立大学、ミクロン精密株式会社) 1-3-3 機能性インターフェース創成(国立大学法人東北大学大学院、山形県工業技術センター、 ミクロン精密株式会社)

・平成 25 年度に逆放電加工による工作物加工面の改質技術を基本的に確立し、機能性インターフェース創成技術へ展開した。(国立大学法人東北大学大学院)

・平成 26 年度は、実施した鋳鉄材料への放電によるシリコン、およびチタンのドーピングにより、 材料表面がビッカース硬度で2倍以上の硬質化を確認した。(国立大学法人東北大学大学院)

・平成27年度は平成25年度の基礎テストからの一連の放電による材料改質データをベースに、 平成26年度に製作したモデル超音波放電スピンドルにUPD研削専用工具を取り付け、機能性イ ンターフェース創成実験を行い、元素のドーピング現象と改質効果の関係について、より詳細に 加工表面を評価しながら電極素材を変化させ、UPD研削専用工具へ混合する元素とその割合を 解析し、現象がどのように変化するか検討し、加工条件の最適化を行う。(国立大学法人東北大 学大学院、山形県工業技術センター、ミクロン精密株式会社) 1-4 研究体制

1-4-1 研究組織及び管理体制

a) 研究組織(全体)



b) 管理体制

① 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

【事業管理者】ミクロン精密株式会社



a) 研究員

氏名	所属·役職	実施内容
		(畨号)
立花 亨	技術部 技術開発1課 参与	1,2,3,4,5 PL
小林 敏	技術部 技術開発1課 課長	1,2,3,4,5
村越 親	設計部 開発設計課員	1,2,3,4,5
小池 一徳	設計部 開発設計課員	1,2,3,4,5
柴田 徹	設計部 制御1課 主任	1-1
武田 勝幸	設計部 制御1課員	1-1

b) 管理員

氏夕	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	実施内容
以石	別周・仅報	(番号)
立花 (再)	技術部 技術開発1課 参与	1,2,3,4,5 PL
小林(再)	技術部 技術開発1課 課長	1,2,3,4,5
荒井 寿洋	管理部 管理課 課長代理	5
米野 裕幸	管理部 管理課 経理係員	5
秋葉 雅彦	調達部 調達課 係長	5
北谷 聡正	調達部 調達課 主任	5

【共同体(研究員)】

株式会社カナック

氏名	役職・所属	実施内容 (番号)
金澤直一郎	代表取締役	②-2

国立大学法人東北大学 大学院医工学研究科 厨川研究室

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
厨川 常元	大学院医工学研究科 医工学専攻 生体機械システム	1)-2、3、4 SL
	医工学講座 生体機能創成学分野 教授	
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	1-2,3,4
	知的デザイン学講座 ナノ精度加工学分野 准教授	
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	1-2,3,4
	知的デザイン学講座 ナノ精度加工学分野 助教	

公立大学法人秋田県立大学 呉研究室

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
呉 勇波	システム科学技術学部	②-3
	機械知能システム学科 教授	
野村 光由	システム科学技術学部	②-3
	機械知能システム学科 准教授	

山形県工業技術センター

氏名	役職·所属	実施内容(番号)
鈴木 庸久	化学材料表面技術部 主任専門研究員	1)-2,2-2,3
村岡 潤一	化学材料表面技術部 專門研究員	1)-2,2-2,3
江端 潔	精密機械金属技術部 開発研究専門員	1)-2,2-2,3
小林 庸幸	精密機械金属技術部 専門研究員	1)-2,2-2,3

実施内容欄の番号は以下の開発項目を示す。

- ① UPD 研削加工装置の製作
- ①-1 UPD 研削専用通液型超音波スピンドルの製作
- ①-2 UPD 研削専用工具の製作
- ② 超音波振動援用研削、プラズマ放電加工の同時加工である UPD 研削による難削材加工 技術の構築
- ②-1 チタン合金加工の高精度・高能率化
- ②-2 超硬合金の微細加工への応用
- ②-3 チタン、ニッケル基合金の高精度形状加工への応用
- ③ 機能性インターフェース創成
- 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

c) 所在地

○ 事業管理者

ミクロン精密株式会社

(最寄り駅:JR 東日本鉄道 山形新幹線 かみのやま温泉駅) 〒990-2303 山形県山形市蔵王上野 578-2

○ 研究実施場所

ミクロン精密株式会社

(最寄り駅: JR 東日本鉄道 山形新幹線 かみのやま温泉駅) < 再掲> 〒990-2303 山形県山形市蔵王上野 578-2

ミクロン精密株式会社 R&D センター

(最寄り駅: JR 東日本鉄道 山形新幹線 かみのやま温泉駅) < 再掲> 〒999-3107 山形県上山市みはらしの丘 19 番地

株式会社カナック

(最寄り駅:JR 奥羽本線 置賜駅) 〒992-0003 山形県米沢市窪田町窪田 2464-6

国立大学法人東北大学 大学院医工学研究科 医工学専攻 生体機械システム医工学講座 生体機能創成学分野 (最寄り駅:JR東日本鉄道 東北新幹線 仙台駅) 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

公立大学法人秋田県立大学 システム科学技術学部 機械知能システム学科 (最寄り駅:JR 羽越本線 羽後本荘駅) 〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノロ 84-4

山形県工業技術センター (最寄り駅:JR 東日本鉄道 山形新幹線 山形駅) 〒990-2473 山形県山形市松栄 2-2-1

第2章 本論

2-1 UPD 研削加工装置の製作

従来切削・研削技術では対応困難な難削材に対して、工具に超音波振動を伝搬させ、工具と 工作物間に高周波パルス電流を流してプラズマを生成させ、それにより加工表面を快削性が向 上するように変化させ、加工効率、加工精度向上を可能とした。同時に快削性の高い材料に対し ては、工作物表面の高強度化を図るプラズマを生成させ、加工表面の機能性インターフェース創 成を可能とする装置の製作をめざした。構成モジュールとして、ベースマシンに3軸制御型デスクト ップ加工機、そしてマイクロバブル、またはナノバブル水も供給可能な加工液供給装置を購入し、 放電用電源としてUPD研削専用電源装置、UPD研削専用通液型超音波スピンドル、UPD専用工 具を製作し、組み合わせて図 2-1-1に示す当該装置を完成させる。



UPD 研削システムの構成

UPD 研削加工装置

図 2-1-1 UPD 研削加工装置

また、UPD 研削で予想されるメカニズム概要を図 2-1-2 に示す。電極への超音波振動伝搬と 高周波パルス電流によるプラズマ放電加工の特徴を表している。



図 2-1-2 電極への超音波振動伝搬と高周波パルス電流によるプラズマ放電加工の特徴

図 2-1-3 は外径 4mm、センターホール内径 0.4mm、長さ 14mm のメタルボンド砥石である。そのセンターホールを通じて砥石先端から工作物に加工液供給する時に超音波振動を伝搬することによる水流の変化を示す。砥石の超音波振動を伝搬することで、流水の勢いが増加していることが分かる。これは超音波振動の伝搬により流路内周面が加工液との粘着作用を低下させる効果によると考える。これにより小径の流路を持つ電極(砥石)においても効率良く加工液を供給可能であり、また加工点周辺の加工層の排出効果も上がると考えられる。



φ0.4 の穴から加工液を供給→流動性向上
左:超音波振動なし 右:超音波振動あり
図 2-1-3 センターホールを有する電着砥石

さらに図 2-1-4 では外径 0.4mm、内径 0.2mm の電極に回転を与え、鉄系材料の工作物を放電 加工する様子である。パイプ電極に超音波振動を伝搬させることで、短絡を抑制し継続的な放電 加工が可能となることを見出した。



被削材:Ti-6Al-4V 左:超音波振動なし 右:超音波振動あり 図 2-1-4 超音波振動援用下での放電加工の様子

2-1-1 液中でのプラズマ発生条件

放電加工において加工液の種類は重要パラメータである。液中でより安定してプラズマを発生 させるための条件を探った。加工液に鉱物油、純水、電解液などで試みたところ、導電性ナノ粒子 と水の混合液がそれ以外の加工液と比較して低い印加電圧で図 2-1-5 に示すようにプラズマが 発生しやすいことを見出した。また、導電性ナノ粒子の混合液を用いて放電加工ことによる加工 表面に変化を及ばす結果をもたらすことも確認している。(図 2-1-13 参照)。



33 ms 間隔 連続写真 マイナス極周りにプラズマ発生図 2-1-5 液中でのプラズマ発生の様子

2-1-2 加工液へのマイクロバブル混入効果

図 2-1-6 に示すように純水精製装置にマイクロバブル発生装置を組み合わせ、加工液供給装置を製作した。さらにマイクロバブル内に封入する気体を選定可能とした。そこで同装置を用いて、 加工液にマイクロバブルを混入させて放電加工面がどのように変化するか比較テストを行った。

図 2-1-7 に加工液に純水を用いた UPD 研削と、その純水に O₂のマイクロバブルを混入した UPD 研削(加工液以外は同一条件)の各加工表面の差を示す。表面粗さの測定値と、表面の SEM 写真で比較した結果、加工液の純水に O₂のマイクロバブルを混入させた方が、加工面の放 電痕が多く発生していることが確認できた。この結果より、マイクロバブルによりもたらされる電極 間の局所的気相は微細な放電を発生しやすくする作用をもたらし、放電改質の効率向上につな がると考えられる。



左: マイクロバブル発生装置

右: 純水生成装置

図 2-1-6 加工液供給装置

- エ作物: Ti-6AL-4V サイズ: 20 x 40 x1 加工面 20 x 1 (平板側面)
- 砥石: 鋳鉄ダイヤ砥石 SD2000N100M (冨士ダイス)

砥石回転速度: 4000 min⁻¹

- 超音波振動: 周波数 50kHz,振幅 6μm_{p-p}
- 電源: UPD 研削専用電源 DUTY 比: 20%
- 工具送り速度: 5mm/s, 切込量:0.002 mm/pass

加工方法: 従来研削で 3N になるまで加工して停止、諸条件設定後、3パス(往復1回半)仕上げ



加工面 SEM 画像(X200)

図 2-1-7 放電用加工液へのマイクロバブル混入効果

2-1-3 チタン合金の高精度研削加工

UPD 研削で純チタン、およびチタン合金の加工を行い、放電作用の援用による加工効率の向 上を確認したが、加工精度を向上させるような結果は確認できなかった。しかし超音波振動研削 において、加工液に特定の添加剤を加えることで研削後の加工表面が向上することを確認した。 これにより固定砥粒では困難だったチタン合金材料の準鏡面領域の表面仕上げが可能であるこ とを確認した。図 2-1-8 にチタン合金の超音波振動研削における添加剤の有無の加工表面およ び図 2-1-9 に表面粗さを示す。



左:添加剤無 右:添加剤有 図 2-1-8 64 チタン合金の超音波振動研削



工作初: 11-6AL-4V

砥石: 鋳鉄ダイヤ砥石 SD2000N100M (冨士ダイス) サイズ 4.0 D x 10T X 3Y X 32L
砥石回転速度: 4000 min⁻¹
超音波振動: 周波数 50kHz, 振幅 6 μm PPP
工具送り速度: 5mm/s, 切込量:0.002 mm/pass

図 2-1-9 チタン合金の高精度超音波振動研削

2-1-4 UPD 研削における高周波パルス電流の効果

直流電流を高周波パルス電流にすることで、図 2-1-10 に示すように鋳鉄ボンド砥石と超硬合 金の工作物間に発生するプラズマが安定し、加工表面にできる放電痕サイズも小さく均一になっ た。また、図 2-1-11 に同一条件での放電研削と従来研削の加工抵抗を比較したところ、放電作 用の援用効果により加工抵抗が低下することを確認した。



図 2-1-10 UPD 研削専用電源装置の効果



図 2-1-11 放電作用の援用効果

a) UPD 研削による加工表面の改質効果

UPD 研削において加工液へのマイクロバブルや導電性粒子の混入が、電極間でのプラズマ発 生に大きな役割を果たすことを捉えたことから、平成 26 年度に製作した焼結チタンボンド砥石を 用いて UPD 研削を行い、工作物の表面改質を加工液別に比較した。図 2-1-12 に実験の様子を 示し、図 2-1-13 にその結果を示す。結果としてやはり導電性粒子を加工物に混入することで砥石 母材のチタン元素が工作物表面へのドープ量が増加し、改質面の硬度が上昇することを確認し た。



加工液によるチタンドープ量の変化検証実験の様子 加工液を砥石上方から電極間に供給、砥石周りにプラズマ発生

図 2-1-12 マイクロバブル水を用いた Ti-6Al-4Vの UPD 研削の様子



図 2-1-13 UPD 研削による加工表面の改質効果

b) UPD 研削専用通液型超音波スピンドルと焼結チタンボンド CBN 砥石による UPD ヘリカル研削 への試み

図 2-1-14 に示す砥粒をダイヤモンドより耐熱性に優れた CBN 砥粒を用いた、外径 9 mm、長さ 22mm の焼結チタンボンド CBN 砥石を UPD 研削専用通液型超音波スピンドルに取り付け、純チ タンの平板を用いて放電ツルーイングを行った様子を図 2-1-15 に示す。図 2-1-16 に鋳鉄材料内 周面 (内径 18mm)を UPD ヘリカル研削する様子を示す。そして図 2-1-17 に同内周面 1 周を約 0.8s で UPD ヘリカル研削を行ったときの様子を示す。現時点では焼結チタンボンド CBN 砥石にセ ンターホールが無いため、砥石先端へ通液しながら UPD 研削するまでには至っていない。



図 2-1-14 焼結チタンボンド CBN 砥石



図 2-1-15 純チタン材による焼結チタンボンド図 2-1-16 UPD 研砥石の放電ツルーイングにより砥石周辺にプラズマ発生UP

図 2-1-16 UPD 研削専用超音波スピンドルによる UPD ヘリカル研削



図 2-1-17 鋳鉄内周面の UPD ヘリカル研削および砥石周辺を移動するプラズマ

2-1-5 モデル超音波放電スピンドルの開発

機能性インターフェース創成実験を行うことを目的として、平成 26 年度にモデル超音波放電ス ピンドルを製作した。国立大学法人東北大学大学院厨川研究室に設置し、山形県工業技術セン ターと共同開発した UPD 研削専用砥石(砥石サイズ φ4×5L)を用いて、UPD 研削を行う。

図 2-1-18 にモデル超音波放電スピンドルの仕様を示す。仕様決定にあたっては研究機関での 運用を考慮して、チラーユニットや潤滑ポンプなどの補機を必要とせず、200V 電源の供給のみで 運転可能なスピンドルシステムを目指した。

モータには空冷式ブラシレス DC モータを採用。このモータを小型ドライバによって駆動させることで、制御系統の省スペース化とチラーユニットなしでの運用を図った。また、スピンドル軸受部の 潤滑方式はグリス潤滑とすることで、装置の潤滑・冷却についても外部潤滑ユニットを必要としな い構造とした。

ミクロン精密株式会社で設計、製作、各種試験を行い、UPD 研削のためのパルス電源と工具 先端を超音波振動させるための超音波振動制御部を接続し、同学での機能性インターフェース創 成実験に供した。山形県工業技術センターと共同開発した UPD 研削専用砥石をモデル超音波放 電スピンドルに取り付け、放電加工によりチタン元素のドーピング効果を確認した。



研削砥石寸法	<i>ф</i> 4×5L
最高回転速度	-1 10,000min
振動振幅	10µm _{p-p}
振動周波数	44kHz
振動モード	軸方向振動
最大出力	45W
スピンドル外径	90mm
全長	350mm
質量	10kg
クーラント供給方法	センターホール方式

図 2-1-18 モデル超音波放電スピンドル仕様

2-1-6 UPD 研削用通液型超音波スピンドルの開発

平成 26 年度までのプラズマ放電研削の基礎実験によって得られたデータから、砥石に援用す る超音波振動の振幅とパルス電流の条件を見極め、UPD研削用通液型超音波スピンドルの開発 を実施した。

サイズアップによる加工適用範囲の拡大を図るため、焼結チタンボンド砥石寸法はモデル超音 波放電スピンドルに使用する砥石と比較して、体積比で22倍に拡大した。砥石サイズの拡大に伴 って増した質量を駆動させるため、超音波振動系の改良を実施した。超音波振動を工具先端に伝 搬させる振幅拡大ホーンは、拡大率を更に高めるべく二段式へと形状変更し、また振動子に内蔵 される圧電素子への給電方式についても、従来方式より高効率な接触給電方式へと変更した。図 2-1-19にシミュレーションによって可視化した振動モードを示す。

砥石サイズを拡大しつつも、スピンドル型式は低振動かつ省スペースとなるビルトインモータ方 式とし、かつセンターホールによって砥石先端にスルークーラントの供給が可能な構造とした。図 2-1-20 に UPD 研削加工装置に搭載した UPD 研削専用通液型超音波スピンドルおよび仕様を示 す。また、スピンドルの主要構成部品である回転駆動部については、より高い信頼性を与えるべく 構造解析を行い、長時間連続稼動が可能な耐久性を確保した。また UPD 研削専用電源装置から の電流の安定化を図るために砥石付近にスリップリングを追加。ノイズの低減を図った。UPD 研 削専用電源装置とも接続を行い、UPD 研削加工装置に搭載し、実用化を追求した加工テストを実 施した。



図 2-1-19 砥石先端部の超音波振動シミュレーションの様子



図 2-1-20 UPD 研削加工装置に搭載した UPD 研削専用通液型超音波スピンドルおよび仕様

2-1-7 まとめ

本研究では、超音波振動やマイクロバブルを用いることで、放電加工に対する効果を捉えた上 で、超硬合金やチタン合金の難削材の研削加工に高能率化、高精度化を可能とする条件を見出 し、さらに、加工表面を積極的に改質させ付加価値を高める試みを行った。さらに量産実用化を目 指した装置製作を行った。以下にその結論を示す。

- 1.放電加工において電極工具への超音波振動の伝搬は、短絡抑制し、加工液の流れを促進させることを確認した。
- 2.放電加工に用いる加工液にマイクロバブルや導電性ナノ粒子を用いることで電極間の放電作 用を促進する可能性があることを確認した。
- 3.焼結チタンボンド砥石を電極に用い、加工液に導電性ナノ粒子を混入することで、改質面のチタ ンドープ量が増え、硬度が増加した。
- 4.外径 9mm 長さ 22mm の焼結チタン CBN 砥石を用いて UPD ヘリカル研削を可能とする装置の 製作が可能となった。
- 5.機能性インターフェース創成実験を行うことを目的としてモデル超音波放電スピンドルの開発を、 砥石をサイズアップしつつビルトインモータ方式とセンタホールスピンドルによる砥石スルークー ラント方式を兼ね備えた UPD 研削専用通液型超音波スピンドルの開発を行った。

2-2 難削材加工への対応

【課題】

・川下製造事業者の課題・ニーズ:超硬合金の溝加工への対応

・ワイヤーボンダー治工具の高品質・多品種への対応

ワイヤーボンダー治工具は,図 2-2-1 に示すように主に超硬合金に 0.5mm 程度の溝加工,穴 加工を施した治具である.近年,半導体デバイスの多様化に伴い,短納期で様々なカスタム仕様 の多品種製品への対応が求められている.さらに,半導体デバイスの高密度化に伴い,加工精 度の改善が課題となっている.そこで,本事業では,放電加工から直彫加工への転換を目的とし, 図 2-2-2 に示す分担体制で以下の課題に取り組んだ.

(1) 超硬合金の放電加工,切削加工,UPD 研削の比較

(2) UPD 研削による超硬合金の高精度・高能率の溝加工

(3) UPD 研削によるワイヤーボンダー治工具の高能率加工



ボンディング装置

図 2-2-1 超硬合金の溝加工による製品の一例



図 2-2-2 UPD 研削による超硬合金の溝加工における分担体制

2-2-1 UPD 研削用工具の製作

高能率除去加工を目指す UPD 研削では、工具と被加工物の間に、局所的にプラズマを生成し、 軟化層あるいは活性化層を形成する工程と、工具切れ刃による切削・研削加工の工程を同時進 行で進め、加工能率の向上させることを一つの目標としている. したがって、UPD 研削では、工具 に求められる特性は多様であり、UPD 研削用工具を開発することは本事業において大切な開発 要素の一つである.

本事業では、まず、ダイヤモンド電着砥石の改良し、 UPD 研削用工具に求められる要素, 耐 キャビテーション特性, 耐プラズマ特性の改善に取り組んだ. 次に, UPD 研削による機能性付与 の観点から、チタンボンド焼結砥石の開発に取り組んだ.

2-2-2 エロージョン特性, エッチング特性に優れた工具の製作

a) 耐キャビテーション特性

UPD 研削では, UPD 研削用工具を超音波により励振し, 被加工物との間でキャビテーションを 発生させる. このキャビテーションがプラズマ生成や放電加工を促進させる効果があるわけである が, 同時にそのキャビテーションは工具にダメージを与える可能性がある. そこで, 耐キャビテー ションに優れる UPD 研削用工具, ダイヤモンド電着砥石の開発を目指す. 具体的には, ダイヤモ ンドを保持するめっき被膜の耐キャビテーション特性(耐摩耗性, エロージョン)を向上させることを 目指した.

b) 耐プラズマ特性

前述のように、UPD研削では、UPD研削用工具と被加工物との間でプラズマ放電を発生させる 加工プロセスである. つまり、UPD研削用工具には、耐キャビテーション特性だけでなく、このプラ ズマ放電に対する耐久性、耐プラズマ特性を有している必要がある. そこで、具体的には、ダイヤ モンドを保持するめっき被膜の耐プラズマ特性を向上させることを目指した.

c) チタンドープ特性

機能性付与の UPD 研削を実現するためには,機能性元素を有するボンド材とそれを用いた焼 結砥石の開発が必要である. そこで,放電プラズマ焼結法を用いて,チタンなどの元素を有する 焼結砥石の開発を行った.

d) キャビテーション特性・耐プラズマ特性

放電にさらされる材料は, 融点および熱伝導率が高いほど, 消耗しにくいことが実験的に検証 されており, 低消耗電極材として銅タングステン等が用いられている. カーボンナノチューブ(CNT) は, ダイヤモンドに匹敵する高い熱伝導性を持つことから, 熱伝導性を向上させる目的で, 複合材 料のフィラーとして注目されている. これまでに CNT を金属・樹脂等に含有させることにより機械 的強度, 電気・熱伝導性が向上したという報告がある. そこで, この CNT を電着工具のニッケルめ っきに含有させることで, 熱伝導の向上が期待でき, 耐プラズマ特性, 耐キャビテーション特性を 改善できる可能性がある.

一方, 放電加工において長パルスの放電加工条件において, 放電加工油から分解生成する不 定形カーボンが電極に付着し, 電極を保護し, 電極消耗を抑制することが知られている. つまり, CNT が電極材側に存在することで, 放電加工条件によらず, 電極表面にカーボンによる電極保護 作用を発現できる可能性もある.

そこで, CNT の複合化によるニッケルめっき被膜を電着工具に応用することを念頭におき, CNT 複合ニッケルめっき被膜に対して放電加工用試験を行い, 消耗特性を評価した.

・CNT 複合電極の作製方法および評価方法

電極材となる CNT 複合ニッケルめっき被膜は,表 2-2-1 に示す CNT を加えたスルファミン酸ニ ッケルめっき浴を用いて形成した. CNT は,超音波ホモジナイザー(Hielscher 社製 UP400S)およ び界面活性剤を用いて純水に分散させた後,めっき浴に加えた.めっき浴中での CNT は界面活 性剤を加えても強い凝集傾向を示すため,常に超音波攪拌を行いながら形成した.

放電加工時の消耗特性は、被加工材をステンレス材、放電加工面を φ2 mm、電極送り量を数 10μm とし、表 2-2-2 に示す条件で放電加工したときの被加工材の消耗量と電極消耗量を測定し、 その比(電極消耗量/被加工材の消耗量)をとることにより評価した。

Туре	CNT1
Carbon purify	\geq 95 %
Diameter	φ60–100 nm
Length	1–2 µm
Surface area	55–65 m ² /g
Thermal decomposition temperature	652 °C
Model	S-MWNT60100
Suppliers	Shenzhen Nanotech Port Co., Ltd

表 2-2-1 実験に用いたカーボンナノチューブ(CNT)の仕様

表 2-2-2 放電加工実験の条件Polarity of electrodePositiveOpen voltage80 VDischarge current8 APulse duration2µsMachining oilEDF-KEDM machineEX8WorkpieceStainless steel, SKD11

CNT を複合したニッケルめっき被膜と通常のニッケルめっき被膜の放電加工時の消耗特性の 比較を図 2-2-3 に示す. CNT を含有したニッケルめっき被膜,通常のニッケルめっき被膜の平均 電極消耗率は,それぞれ 28.9%,55.0%であり,CNT を含有したニッケルめっき被膜が放電加 工時の消耗が少ないことが分かった.以上より,CNT をニッケルめっき被膜に含有させた電着工 具を作製することで,耐プラズマ特性を向上させることができることが分かった.また,耐キャビテ ーション特性の評価として,CNT の複合化による耐摩耗性の評価を行い,耐摩耗性が改善するこ とを確認した.



図 2-2-3 CNT 複合ニッケルめっき被膜と通常ニッケルめっき被膜の消耗率の比較

・チタンドープ特性

機能性インターフェース創成に向けたチタンボンド焼結砥石の開発を行った. チタンボンドの UPD 研削によって, 被加工物へのチタンの移行することを確認し, 開発したチタンボンド砥石が有 効であることを示した.

図 2-2-4 に、放電プラズマ焼結によるチタンボンド焼結砥石の概念図を示す. チタン粉(平均粒 径 45µm)とダイヤモンド砥粒(#400)を放電プラズマ焼結し、φ50mm のチタンボンドタイヤモンド砥 石を作製した. その後、ワイヤーカットにて切り出し、シャンクに取り付けて軸付き砥石を作製した. 開発したチタンボンド砥石によって UPD 研削を行い、研削痕が残る被加工物表面に 3~5wt%のチ タンがドープされている様子を確認でき、また硬さはビッカース硬さで 1000HV を超えた. 以上より、 開発した UPD 研削工具が、機能性インターフェースの創成に用いることができることが示された.



図 2-2-4 機能性インターフェース創成に向けたチタンボンド焼結砥石の開発の概念図

2-2-3 超硬合金の溝加工への対応

幅 0.5mm, 深さ 0.5mm の溝加工をミリング加工, 従来の放電加工, 超音波援用切削・研削加工, そして UPD 研削加工により, 加工効率と加工精度の比較実験を行い, UPD 研削により通常の加 工と比較して, 同様の加工精度を 2 倍の加工能率で実現できることを確認した.

UPD 研削では、プラズマによる改質層を形成し、その改質層を切削・研削による除去するモデ ルを考えている. プラズマによる加工変質層は厚く形成することが困難であると予測されることか ら、溝の深さ方向の切込みを浅くし、送りを速くする加工条件で、超硬合金の溝加工において、図 2-2-5 に示す定電圧パルス制御による UPD 研削を行った. パルス条件および加工液を適切に選 択することで、加工抵抗の改善、加工面品位の向上が可能であることがわかった.



図 2-2-5 定電圧パルス制御による UPD 研削の概念図

	ダイヤモンド電着軸付砥石
工具	工具径 φ 0.45mm, 砥粒 サイズ#400,
	砥粒埋込率 80%
被削材	超微粒子超硬合金 F20
加工液	NaCl 30g/L 水溶液, 浸漬
回転数	50,000 min ⁻¹
送り速度	1,440 mm/min
1パスあたりの 切込深さ	0.2µm
電解の極性	被削材:正,工具:負
	パルス電源,電圧制御
電源	ON 時間:100msec
	OFF 時間: 200msec
印加電圧	0 - 15V

表 2-2-3 UPD 研削条件

表 2-2-3 に示す UPD 研削条件で, 超硬合金の溝加工を行った結果, 図 2-2-6 および図 2-2-7 に示すように, 最大で, 加工抵抗が約 15%改善, 加工面品位の向上(Ra 約 20%低減)を達成した.



図 2-2-6 定電圧パルス制御による UPD 研削の概念図



(a)通常研削(Ra 0.369µm)

(b) UPD 研削(Ra 0.287µm)

図 2-2-7 UPD 研削による超硬加工面の電子顕微鏡写真

・UPD 研削によるワイヤーボンダー治工具の高能率加工

超硬の高能率加工の最終ステップとして、ワイヤーボンダー治工具の高性能化および加工能 率の向上に向けて、UPD研削による表面改質(高硬度化)の加工条件の検討を行い、その効果を 確かめた。 ワイヤーボンダー治工具は、耐摩耗性の点から超硬合金を用いる場合があるが、その耐摩耗 性は表面だけで良い. したがって、図 2-2-8 のように鋼材の表面のみを超硬並に高硬度化するこ とができれば、超硬を直接溝加工することに比べて、大幅に生産効率を改善できる可能性がある. そこで、開発したチタンボンド砥石およびポーラス炭化チタン電極を用いたワイヤーボンダー治工 具の UPD 研削による表面改質を行った. UPD 研削条件は、極性:(-)、電流:4.5A、パルス幅: 2.0 µs、休止時間:64.0 µs、主軸回転:250-500 rpm とした. 図 2-2-9 に UPD 研削前後のワイヤー ボンダー治工具外観を示す。



図 2-2-8 UPD 研削のワイヤーボンダー治工具の高高度化の概念図



図 2-2-9 UPD 研削前後のワイヤーボンダー治工具



図 2-2-10 チタンボンド砥石による加工面

純チタンとダイヤモンドで構成されているチタンボンド砥石の結果と炭化チタンのみで構成され ているポーラス炭化チタン電極の結果を比較する.ビッカース硬さは,UPD 研削前に 310.4HV で あった被加工物が,チタンボンド砥石で 898.3HV(σ=142.8),ポーラス炭化チタン電極で 1349.1HV(σ=216.3)となり,UPD 研削により硬度が大幅に改善された.また,ポーラス炭化チタン 電極の方が,チタンのボープ量が多く,硬さが向上することが確認できた.一方,砥粒を含まない, ポーラス炭化チタン電極では,エッジ部にダレが見られ,形状精度の面では,チタンボンド砥石の 方が有効であることが分かった.以上の結果より,チタンボンド砥石の焼結条件(焼結密度の制 御),純チタンと炭化チタンの配合比,ダイヤモンド砥粒の集中度の設定により,チタンのドープ量 や形状精度を制御できることが示唆された.図 2-2-10 にチタンボンド砥石による加工面を示す。

超硬製ワイヤーボンダー治工具は、従来放電加工で行っていたため、銅タングステン電極の切 削加工(約6時間)およびその電極を用いた放電加工(約1時間)の計約7時間の加工時間であ ったが、この UPD 研削による表面改質を用いることで、鋼材を被加工物として用いることが可能と なり、切削加工(約0.5時間)および UPD 研削(約0.5時間)の計約1時間の加工時間に2倍以 上短縮できる.また、電極レスとなるため、短納期、多品種製品への対応が可能となる.本成果は、 これまで取り組んできた UPD 研削による超硬の溝加工の成果とともに、加工能率を改善する有 効な手段となるといえる. 2-3 チタン合金、ニッケル基合金の超音波振動援用プラズマ放電研削の基礎加工特性 2-3-1 はじめに

チタン合金は高い比強度、耐食性や耐熱性などの機械的性質、ニッケル基合金は高温クリー プ特性、高温疲労特性、耐酸化性、耐高温腐食性等をそれぞれ有しており、高度先端技術の各 種機器に利用されている。反面、これらの材料は低熱伝導率、低密度、低比熱、不均一な変形に よる切りくず生成の不安定、高い化学反応性、小さい弾性係数等により、切削温度が高温となる ことや切削の不安定性、工具寿命が極端に短くなることなどが知られている。

これらの難削材を高精度・高能率加工するため、超音波援用プラズマ放電(UPD)研削装置を 構築して、チタン合金やニッケル基耐熱合金の UPD 研削実験を試み、加工特性の体系的実験調 査を行った。具体的には、平成 25 年は予備実験として、プラズマ放電なしでこれら難削材の超音 波援用研削を行った。そして平成 26 年は、平成 25 年度の予備実験結果を踏まえて、超音波援用 研削装置に高周波パルス電源システムを組み込むことによって UPD 研削装置を構築し、電解ま たはプラズマ放電後のワーク表面の硬さ測定や元素分析等によって難削材の酸化現象を確認し た。最後に平成 27 年は、超音波有無によるパルス放電頻度とピーク電流値の違いを比較した上、 研削抵抗、加工面粗さや加工面・切屑の酸化、切屑のサイズと形態、砥石の摩耗、そして溝加工 特性に超音波及ぼす印加電圧や超音波の影響について調査した。



図 2-3-1 構築した実験装置の外観図

2-3-2 UPD 研削システム

図 2-3-1 に構築した UPD 研削実験装置の外観図を示す。小型超音波スピンドル(株)industira, R2)を搭載した 3 軸同時制御デスクトップ型加工機(高島産業株), Multi ProIII)をベースに, 直流安 定化電源と高周波パルススイッチング装置からなるパルス電源システムを接続したものである。

加工部の詳細を図 2-3-2 に示す。ワークを陽極、直径 φ1.8 のメタルボンド cBN 砥石を装着した 超音波スピンドルのホーンにカーボンブラシを接することで陰極としている。研削抵抗はワークの 下に設置した圧電型動力計(日本キスラー(㈱, 9601)を用いて測定する。

この装置を用いて加工実験を行う際の概念図を図 2-3-3に示す。砥石とワーク間に間隙 △を設けて導電性を有する研削液(電解液)を流し込んで通電させることによって、電解やプラズマ放電

現象を発生させる。このとき、超音波振動は周波数 40kHzと振幅 4.0µm_{p-p} で砥石軸方向に発生さ せて、電解やプラズマ放電効果の向上を図る。研削実験は、砥石側面による側面研削と砥石の 端面による正面研削があり、以降それぞれ「超音波援用側面 UPD 研削」と「超音波援用正面 UPD 研削」と呼ぶ。ワークには、チタン合金(Ti-6Al-4V)、ニッケル基合金(Rene77)と超硬 F20 を それぞれ使用した。電解やプラズマ放電後のワーク表面について、SEM((㈱エリオニクス, ERA-8900)と EDX (EDAX Inc, Genesis APEX)を用いて元素分析を行った上、ビッカース硬度計 (㈱アカシ, VALPAK2000)で硬さを、触針式表面形状測定器(Taylor Hobson Inc., Form Talysurf Intra)で断面形状を測定した。また、加工中は電流計(クランプオンプローブ 3273-50)を用い電流 のモニタリングを行った。実験では、表 2-3-1 に示す条件で研削を行った。



図 2-3-2 システムにおける加工部の拡大写真



図 2-3-3 加工概念図

研削方法	超音波援用研削(UAG)、正面 UPD 研削、側面 UPD 研削、溝の UPD 研削			
超音波振動	周波数 f	0, 40 kHz		
	振幅 A _{p-p}	0, 4.0 μm		
研削砥石	cBN1000N100M、CBN5000N100M(UAG のみ)			
	寸法;φ1.8×t3.14 mm			
	砥石周速 ng	5000、10000、15000、18000(溝加工)min ⁻¹		
	間隙(放電実験) 🧷	50 µm(正面 UPD 研削)		
	切り込み量 $arDelta_g$	1 μm(UAG, 20 回), 10, 20, 30 μm		
	回数	1、10(溝加工)、20(UAG)		
ワーク	Rene 77 ((L10×H4.35mm))			
	Ti-6Al-4V (L10 \times W10 \times T8 mm)			
	S45C(<i>L</i> 15× <i>W</i> 10× <i>T</i> 10mm)			
パルス電源	電圧	0~160 V		
	周波数	0.2MHz		
	duty 比	1:4 (ON:OFF)		
電解液	KNO3 電解液 5%希釈			

表 2-3-1 実験条件

2-3-3 電解やプラズマ放電なしでの超音波援用研削

まず UPD 研削に向けての予備実験として、パルス電源を OFF して#1000 の cBN メタルボンド 砥石を用いて UAG 実験を行った。図 2-3-4(a)と(b)にそれぞれ Ti-6AI-4V と Rene77 の超音波有 無における砥石回転数に伴う面粗さ Ra の変化を示す。いずれのワークにおいても、砥石回転数 の増加にともない面粗さは小さくなることがわかる。特に、超音波あり・砥石回転数 15000min⁻¹ の ときに Ti-6AI-4V では 55.4nmRa、Rene77 では 46.5nmRa を示しており、それぞれ慣用研削のそれ と比較して 35%、17%向上していることがわかる。ここで、さらなる加工面品位の向上を目指して #5000 の砥石を使用した面粗さの測定結果を図 2-3-5 に示す。このとき、超音波を援用すると Ti-6AI-4V では 44.1nmRa、Rene77 では 15.7nmRa を示しており、それぞれ従来研削のそれと比較 して 10%、15%向上していることがわかる。したがって、超音波援用研削は難削材の高品位加工 面創製に有効であることが示された。







図 2-3-5 超音波援用の有無における面粗さへの砥粒サイズの影響

次に、超音波あり・なしで得られたワークの断面形状を測定した。図 2-3-6 と図 2-3-7 にそれぞ れ Ti-6Al-4V と Rene77 の測定結果を示す。図 2-3-6 よりわかるように、超音波あり(図中左側)で は加工面が未加工面とほぼ平行であるのに対して、慣用研削(図中右側)では斜めになっている。 未加工面を基準にして実質切込み深さを測定すると、超音波ありでは 18.5µm であり、なしでの 17.5μm より設定値の 20μm に近づいている。Rene77 のワーク断面形状(図 2-3-7)に目を向ける と、超音波あり・なしとも加工面が斜めになっているが、実質切込み深さは超音波なしでの 17μm より超音波ありでは 18μm と大きくなっていることがわかる。これらによって、超音波援用研削で 難削材を高精度で高能率に加工できることが示された。

2-3-4 炭素鋼(S45C)の酸化現象調査

構築したシステムの動作特性を確かめるため、10000min⁻¹で回転している砥石の端面とワーク 間に50µmの間隙を置いて三角状パルス電源(電圧10V、周波数40kHz、duty比1:4)を与えて超 音波あり・なしで得られたワークの表面を調べた。図 2-3-8 に超音波なし・ありでのワーク表面写 真を示す。超音波なしで直径4mm程度、超音波ありで直径2.5mm程度の酸化層が生成されてい ることが確認できた。特に、超音波ありで中心部の未酸化領域が減少している様子である。これ は、超音波を援用することにより電解液の挙動が変化し、集中的に作用したものと考えられる。

これらの領域について SEM 観察と EDS マッピングを行った結果を図 2-3-9 に示す。同図(c), (d)から、超音波なしでは酸化領域の中心部に母材の Fe が顕在しているのに対して、超音波あり では Fe が減り、酸化が促進されていることが確認される。また、超音波を援用すると O ((e), (f))と C((g), (h))の増加もより顕著となることがわかる。



図 2-3-6 Ti-6Al-4V の加工後の断面形状

図 2-3-7 Rene77 の加工後の断面



(a) 超音波なし(b) 超音波あり図 2-3-8 超音波電解後の酸化層観察例



図 2-3-9 電解後の EDS マッピング

この領域における数箇所について元素分布の定量分析を行い、Wt %を求めた結果を図 2-3-10 に示す. ここで、わずかに発生している K と Cl は電解液(KNO3 希釈液)に含まれたものが 電解による化学反応で発生したと思われる。超音波の有無に関わらず、電解後は C、O の増加、 Fe の減少が見られ、特に超音波有りではこれらの傾向がより顕著に表れる。また、酸化領域硬さ の測定結果を図 2-3-11 に示す。ワーク表面の硬さは酸化前に約 80 HV であったのに対して、酸 化後に超音波の有無に関わらず約 60 HV となった、これらの結果から、構築した装置の有用性が 確認された。



2-3-5 チタン合金の側面 UPD 研削の基礎特性

図 2-3-12 にチタン合金 Ti-6Al-4V の研削抵抗を示す。超音波のあり・なしに関わらず、放電電 圧と研削抵抗の比例関係が見られない。放電電圧が 40~100V では研削抵抗がほぼ一定となり、 電圧の影響をあまり受けないが、40V 以下もしくは 100V 以上になると研削抵抗が大きくなる。こ れは、電圧が低いときに酸化層が薄く、砥粒切れ刃切り込み深さが酸化層厚みより大きくて一部 の母材も削られ大きな抵抗になるためと思われる。一方、電圧が高すぎると、放電による酸化の 発生ではなく放電による高温でワーク材料が再結晶化して硬くなり抵抗の上昇につながっている かと考えられる。超音波の影響に目を向けると、超音波ありでは抵抗が小さい。すなわち、UPD 研削では極めて小さい研削抵抗で研削を実現できることがわかった。

図 2-3-13 に、超音波有無における UPD 研削後のワーク加工面粗さを示す。まず放電電圧の 大きさに関わらずに超音波ありのほうは良い表面が得られていることがわかる。また、面粗さに対 する放電電圧の影響は、抵抗の場合と似ており、電圧が低いときも高いときも面粗さが大きく、超 音波なし時に 20V~80V、超音波あり時に 20V~120V の間で面粗さがほぼ一定となる。電圧が 高すぎるとワーク加工面上に深い放電痕が観察され、それによって面粗さが悪くなったと考えられ る。

上述の研削抵抗と面粗さに対する超音波や放電電圧の影響を考察するために、ワークの研削 領域と生成した切り屑について、EDS マッピングを行い、元素分布を調べた。その結果を図 2-3-14 に示す。同図(a), (b)から、超音波ありで研削したワークの表面には酸素の分布密度が非 常に低いのに対して、切り屑には酸素の分布密度が高いことが確認される。また、同図(c)よりわ かるように、超音波を援用するとワーク加工面にも切りくず表面にも酸素の分布密度がわずかな がら超音波なしより高い。特に、放電電圧が0から40V付近に高くなる間は酸素の分布密度が顕 著に増加するが、その後殆ど変わらないことが確認される。

また、生成した切り屑を集めて、SEM による面積測定を行った。その結果を図 2-3-15 に示す。 同図(b), (c), (d)から、電圧が増加すると最初は切り屑の面積が減少するが、100V 以上になると 面積が増加に転じる。特に、160V になると面積が大幅に増加したことが明らかである。また、超 音波ありでの切り屑の面積は超音波なしでのそれより小さい。



図 2-3-12 Ti-6A1-4V の研削抵抗の測定結果

図 2-3-13 面粗さの測定結果



(a)研削したワーク表面の元素分布



(b)生成した切り屑表面の元素分布



図 2-3-14 UPD 研削によるワーク表面と切りくずの元素分布



図 2-3-16 砥石摩耗量への電圧と超音波の影響 図 2-3-17 砥粒摩耗への電圧と超音波の影響

さらに、図 2-3-16 に超音波有無における砥石半径摩耗量に及ぼす放電電圧の影響を示す。図 よりわかるように、慣用研削(超音波なし・放電電圧 0V)では 4µmの摩耗量に対して、放電せず超 音波を付与するだけで摩耗量が約半分の 2.2µm に小さくなった。そして超音波付与の状態で 4V の放電電圧を印可すると摩耗量がさらに半分以下の 1µm に小さくなった。その後、電圧が増加し ても摩耗量がほぼ変わらないことがわかる。これは UPD 研削では砥石径の減りが慣用研削の約 4 分の 1 と非常に小さいことを示す。特に注目すべき点は、超音波付与がなくてもプラズマ放電の みで砥石径の減りが約 4 分の 1 になることである。これは、低い研削抵抗と小さい酸化層(TiO₂) の摩擦係数という二つの現象の相乗效果によるものである。また、使用前後の砥石作業面上の 砥粒について SEM 観察を行い、砥粒の摩耗形態を調べた。図 2-3-17 に超音波有り無しにおいて 放電電圧を変えながら使用した砥石作業面上の 50 個の砥粒の摩耗形態をまとめた調査結果を 示す。明らかに、慣用研削では砥粒の脱落が多いが、UPD 研削では砥粒の破砕が多い。 2-3-6 UPD 研削によるチタン合金の溝加工

図 2-3-18(a)~(d)にそれぞれ研削抵抗と材料除去比率に及ぼす切込深さと放電電圧の影響を 示す。超音波の有無に関わらず、放電電圧の増加に伴って抵抗が小さくなることがわかる(同図 (a))。研削抵抗への切り込み深さの影響(同図(b))では UPD 研削も慣用研削と同様に切込深さの 増加となって抵抗が大きくなる傾向であるが、放電電圧が高くなると切込深さの増加に伴う研削抵 抗の増加率が低減することがわかる。同図(c)より、除去比率に及ぼす放電電圧の影響は、超音 波あり・なしに関わらず電圧が低い段階で電圧の上昇に伴って比率が急増であるが、その後増加 率が大幅に低減した。超音波あり・なしについて比較すると、超音波あり時の比率が超音波無し 時の約170%と大きく向上している。特に放電電圧100V で超音波を援用すると除去率が100%近 くとなり、切り残しがほとんど発生しない。続いて切り込み深さの影響(同図(d))に目を向けると、 電解電圧の高低に関わらずに切込深さの増加に伴って除去比率が低くなるが、電圧が高いほど 除去比率の減少率が小さくなる。一言でまとめると、超音波ありで放電電圧を高くすると除去比率 が高く、また除去比率が切り込み深さの増加に伴って減少する。



図 2-3-19(a)~(d)に、それぞれ慣用研削(超音波無し・放電電圧 0V)、超音波援用研削(超音波 有り・放電電圧 0V)、PD 研削(超音波無し・放電電圧 80V)、UPD 研削(超音波有り・放電電圧 80V)によって 10µm/1 回×10 回でチタン合金(Ti-6Al-4V)上に加工された溝の 2D と 3D 顕微鏡写 真を示す。図よりわかるように、UPD研削では、他の3方式と比べ、形状精度でも表面品質でも良い溝が加工されている。溝の深さも設定値の100µmに近い値となっている。

2-3-7 まとめ

3年間にわたって実験装置の構築と予備実験、また側面研削や正面研削実験、そして溝加工 実験など難削材の UPD 研削特性の実験調査を進めた。得られた結果を次のように要約する。

- ・難削材の UPD(超音波援用プラズマ放電)研削に向けての予備実験として、チタン合金 (Ti-6Al-4V)とニッケル基耐熱合金(Rene 77)について超音波援用研削を施した。その結果、慣 用研削と比べ面粗さは 35%(Ti-6Al-4V)と 17%(Rene 77)程度向上し、実質切込み深さも良好 な値を示すことが明らかになった。
- ・超音波スピンドルとパルス電源システムを既設卓上型3軸加工機に付設することによって UPD 研削実験装置を構築した。炭素鋼(S45C)について低電圧での酸化現象と酸化層の生成が確 認され、酸化層のビッカース硬さが母材のそれより低いことから、構築した実験装置の有用性 が確かめられた。
- ・砥石の端面を使って切込み深さ 3µm で Ti-6Al-4V 試料の正面研削を行った結果、UPD 研削で は法線研削抵抗 F_n が慣用研削のそれと比べ最大で 60%減少した。
- ・Ti-6Al-4VのUPD研削における砥石の半径摩耗量が慣用研削のそれの4分の1程度で大幅に 小さくなった。また慣用研削で砥粒の脱落が多いのに対し、UPD研削で砥粒の破砕が多い。
- Ti-6Al-4Vの溝加工では、慣用研削と比べ UPD 研削の研削抵抗が半減し、材料の実除去量も 倍増して除去比率がほぼ100%に達した。また、深さが100µmの溝の創製加工では、UPD研削 によって品位の高い溝が創製できた。

なお、ニッケル基耐熱合金(Inconel 718)と超硬合金(F20)についてもUPD研削を試み、慣用研 削と比べると Inconel 718 の研削抵抗がわずか小さいが、F20 のそれが最大で 47%減少したこと が明らかになった。



図 2-3-19 10µm×10 回研削(累積設定除去深さ 100µm)で形成された溝

2-4 機能性インターフェース創成

本研究では UPD 研削により工作物加工面を改質することで,加工面の高硬度化や耐摩耗性・ 耐食性の向上など種々の表面機能向上を狙っている.例えば材料表面を加工プロセス中に高硬 度化することにより,その材料を高効率かつ高精度に研削加工を行うと同時に,材料の耐摩耗性 を向上させることができると考えている.具体的な方法としては,UPD 研削中に加工面に特定の 元素をドーピングすることにより,加工面近傍において化学組成や構造を変化させ,高い表面機 能を有する界面,いわゆる「機能性インターフェース」を創成する.本事業では,Si元素含有電極 および Ti 元素含有電極と工作物間に放電を利用したプラズマを発生させ,加工面への各元素の ドーピングの有無について検証を行った.さらに得られた表面の機能性向上に関してまずは表面 の硬度と摩擦係数に注目し,各処理面の硬さ測定および摩擦・摩耗試験を行った.

2-4-1 放電表面処理による加工面評価

a) 放電表面処理方法

本研究では、プラズマによる元素のドーピング効果について放電表面処理を行うことにより検証した. 図 2-4-1 は本装置の処理部の拡大写真である. 電極には、Si 製電極および TiC 製電極を用いた. 工作物には、ねずみ鋳鉄 FC250 を用いた. 電極をマイナス極性, 工作物をプラス極性とし、加工液である油の中で極間にパルス放電を発生させて処理を行った.



図 2-4-1 放電表面処理の様子

b) 単発放電痕解析

铸鉄基材に対する TiC 処理および Si 処理の成膜性を明らかにするために、単発放電痕を作成 した.本解析では標準条件における TiC 処理, Si 処理に加えて、放電電流、パルス幅の影響につ いても評価した.実験変数として放電電流を、2,10,20 A、パルス幅を 4,8,16 µs とそれぞれ変 化させ、基材上に生成された放電痕の走査型電子顕微鏡(SEM)観察、エネルギー分散型 X 線 分光(EDX)分析を行った.放電電流変化時の単発放電痕の SEM 像を図 2-4-2に示す.同図より TiC 処理面および Si 処理面ともに放電電流の増大に伴い、痕径も増大することを確認した.



(a) TiC 電極での単発放電痕



(b) Si 電極での単発放電痕

図 2-4-2 放電電流変化時の単発放電痕の SEM 像

次に、パルス幅変化時の単発放電痕の SEM 像を図 2-4-3 に示す. 同図においても TiC 処理 面および Si 処理面ともにパルス幅の増加に伴い、痕径も増大することを確認した. 放電電流、パ ルス幅が大きくなることで放電エネルギーが増加し、電極、鋳鉄基材に作用する熱エネルギーも 大きくなると考えられる. また、放電電流変化時の単発放電痕の EDX 像を図 2-4-4 に、パルス幅 変化時の単発放電痕の EDX 像を図 2-4-5 に示す. 同図より TiC 処理面、Si 処理面に共通して、 放電痕内に陥没部を確認し、EDX 分析により本陥没部には炭素が濃化していることを確認した.



(a) TiC 電極での単発放電痕



(b) Si 電極での単発放電痕

図 2-4-3 パルス幅変化時の単発放電痕の SEM 像



(a) TiC 電極での単発放電痕



(b) Si 電極での単発放電痕

図 2-4-4 放電電流変化時の単発放電痕の EDX 像



(a) TiC 電極での単発放電痕



(b) Si 電極での単発放電痕

図 2-4-5 パルス幅変化時の単発放電痕の EDX 像

c) 鋳鉄基材への放電処理面の評価

鋳鉄基材全面に放電表面処理を施した. 全面に一様な処理を行うため, 電極は TiC 電極(ϕ 60 mm), Si 電極(ϕ 100 mm)を使用した. 加工は前節に示した標準条件の下で行った. 図 2-4-6 に示 す放電処理面の EDX 像より, TiC 処理面, Si 処理面ともに, 単発放電痕観察時と同様に多くの陥 没部を含むことを確認した. また, 前節と同様にいずれの場合も陥没部には炭素が濃化している ことを確認した.

次にピンオンディスク摩擦試験により放電処理面の摩擦特性を評価した.本試験では,基材を 油中に浸し,試験ピンを往復運動させることで測定を行った.表 2-4-1 に摩擦係数測定結果を示 す.同表より,TiC処理面およびSi処理面ともに鋳鉄基材に比べて,いずれの往復速度での試験 においても摩擦係数が低減していることが確認できる.これは,放電表面処理により形成された 陥没部が,鋳鉄摩擦面に形成されたマイクロディンプルと同様,油溜まりとして作用しているため であると考えられる.

また,処理面の硬度測定を行った.本試験では、5 点測定により硬度の比較を行った.硬度試験結果を図 2-4-7 に示す.同図より TiC 処理面および Si 処理面ともに鋳鉄基材に比べて高硬度 を有することを確認した.さらに TiC 処理面と Si 処理面を比較した場合, TiC 処理面の方が高硬 度を有することを確認した.TiC のビッカース硬度が 2500~3000 HV,単結晶シリコンの硬度が 1046 HV であることから,放電処理面の硬度は使用電極硬度に依存すると考えられる.



(a) TiC 電極での単発放電痕



(b) Si 電極での単発放電痕

図 2-4-6 パルス幅変化時の単発放電痕の EDX 像

衣 2-4-1 库尔休奴则上和木				
	30 cpm	60 cpm	120 cpm	average
TiC 処理	0.133	0.149	0.144	0.142
Si 処理	0.132	0.138	0.131	0.133
鋳鉄	0.271	0.280	0.176	0.242

表 2-4-1 摩擦係数測定結果



図 2-4-7 硬度試験結果

2-4-2 まとめ

本研究では, 鋳鉄基材への放電表面処理を行い, 耐摩耗性, 摩擦特性について検討を行った. 以下に結論を示す.

- (1) 単発放電痕の分析により、放電電流、パルス幅を増加させることで、単発痕径は増大することを確認し、また、処理面に炭素が濃化した陥没部が見られることを確認した.
- (2) 鋳鉄への処理面の摩擦係数測定により, TiC 処理, Si 処理ともに, 摩擦係数低減に有効であると確認した.
- (3) 鋳鉄に放電表面処理を行うことで高硬度面形成が可能であり、また、TiC 処理面、Si 処理面 の比較により、TiC 処理が高硬度面形成により有効であると確認した.

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

3-1-1 ミクロン精密株式会社

平成25年度は、難削材である超硬合金、チタン合金、ニッケル基合金を工作物とした基礎実験 や、プラズマ放電による工作物へのドーピング効果を確認する基礎実験を行った。

平成 26 年度は、UPD 研削の実用化に向け、プラズマ放電や超音波振動を様々な環境下で組 み合わせ、各種材料をターゲットとして表面改質を試みてきた。

そこで得られた主な結果としては、電極材料の選定とともに、加工液の選定も重要な要素であ ることが分かった。油、純水、また電解質やマイクロバブルの混入などが、工作物表面の硬度、表 面粗さに明確な影響をもたらすことが確認できたことは、UPD 研削の様々な材料への適応におい て重要であり、また容易に設定条件を変化させて表面改質後の性状をコントロール可能にするこ とにおいても重要な発見と考えられる。

さらに、砥石と工作物間の 10µm オーダーの狭小空間でのプラズマ放電において、超音波振動 や高周波パルス電流、また加工液にマイクロバブル水を用いることで様々な変化をもたらすことを 捉え、結果的には、均一で安定したプラズマ放電の発生を可能にした。このことは UPD 研削の実 用化に向けての重要な展開になったと考えられる。

平成 26 年度に製作したモデル超音波放電スピンドルは、ミクロン精密株式会社で超音波発振 試験、通液試験の後、東北大学大学院厨川研究室に設置し、平成 27 年度事業において機能性 インターフェース創成実験に供した。

UPD 研削専用通液型超音波スピンドルに関しては、平成 25 年度から平成 26 年度前半までの 加工データと、構造解析の結果をもとに開発し、3 軸制御型デスクトップ加工機に UPD 研削専用 電源装置と加工液供給装置とともに搭載し、平成 27 年度に、量産実用化を目指した UPD 研削加 工装置として製作を完了し実験に供した。

UPD 研削専用工具に関しては、平成 26 年度より山形県工業技術センターにて焼結チタンボン ドダイヤモンド砥石を開発し、モデル超音波放電スピンドルに取り付け、異常発熱なく超音波振動 することを確認、さらに放電加工によりチタン元素のドーピング効果も確認した。平成 27 年度に直 径 9mm、長さ 22mm として、従来の砥石に対し、体積比で 22 倍にサイズアップした焼結チタンボン ド CBN 砥石を開発し、周波数 47kHz、振幅約 6 μmpp で超音波振動を安定的に伝搬させることを可 能とし、実用化を踏まえた鋳鉄材の UPD ヘリカル研削加工テストを行った。

総じて、本研究では、超音波振動やマイクロバブルを用いることで、放電加工に対する効果を 捉えた上で、超硬合金やチタン合金の難削材の研削加工に高能率化、高精度化を可能とする条 件を見出し、さらに、加工表面を積極的に改質させ付加価値を高める試みを行った。さらに量産実 用化を目指した装置製作を行った。以下にその結論を示す。

(1) 放電加工において電極工具への超音波振動の伝搬は、短絡を抑制し、加工液の流れ を促進させることを確認した。

- (2) 放電加工に用いる加工液にマイクロバブルや導電性ナノ粒子を用いることで電極間の 放電作用を促進する可能性があることを確認した。
- (3) 焼結チタンボンド砥石を電極に用い、加工液に導電性ナノ粒子を混入することで、改質 面のチタンドープ量が増え、硬度が増加した。
- (4) 外径 9mm 長さ 22mm の焼結チタンボンド CBN 砥石を用いて UPD ヘリカル研削を可能 とする量産実用化を目指した UPD 研削加工装置が実現した。
- (5) モデル超音波放電スピンドルの開発、および UPD 研削専用通液型超音波スピンドルの 開発を行った。

3-1-2株式会社カナック・山形県工業技術センター

難削材加工について、本事業では、川下製造事業者の課題・ニーズとして超硬合金の溝加工 への対応、特にワイヤーボンダー治工具の高品質・多品種への対応が求められている。

ワイヤーボンダー治工具は,主に超硬合金に 0.5mm 程度の溝加工,穴加工を施した治具である.近年,半導体デバイスの多様化に伴い,短納期で様々なカスタム仕様の多品種製品への対応、さらに,半導体デバイスの高密度化に伴い,加工精度の改善が必要となっている.そこで,本事業では,放電加工から直彫加工への転換を目的とし,以下のような課題に取り組んだ.

(1) 超硬合金の放電加工,切削加工,UPD研削の比較

ダイヤモンド電着砥石を改良し, UPD 研削用工具に求められる要素, 耐キャビテーション特性, 耐プラズマ特性の改善に取り組んだ.次に, UPD 研削による機能性付与の観点から, 機能性イン ターフェース創成に向けたチタンボンド焼結砥石の開発を行った. UPD 研削を行い, 被加工物表 面に 3~5wt%のチタンがドープされている様子を確認でき, 硬さはビッカース硬さ1000HVを超えた. 以上より, 開発した UPD 研削工具が, 機能性インターフェースの創成に有効であることが示され た.

(2) UPD 研削による超硬合金の高精度・高能率の溝加工

超硬合金の溝加工への対応として、幅0.5mm,深さ0.5mmの溝加工をミリング加工,従来の放 電加工,超音波援用切削・研削加工,そして UPD 研削加工により,加工効率と加工精度の比較 実験を行い, UPD 研削により通常の加工と比較して,同様の加工精度を2倍の加工能率で実現 できることを確認した.

パルス条件および加工液を適切に選択することで,加工抵抗の改善,加工面品位の向上が可 能であることがわかった.最大で,加工抵抗が約15%改善,加工面品位の向上(Ra約20%低減) を達成した.

(3) UPD 研削によるワイヤーボンダー治工具の高能率加工

超硬製ワイヤーボンダー治工具は、従来放電加工で行っていたため、銅タングステン電極の切 削加工(約6時間)およびその電極を用いた放電加工(約1時間)の計約7時間の加工時間であ ったが、UPD研削による表面改質で、鋼材を被加工物として用いることが可能となり、切削加工 (約0.5時間)および UPD 研削(約0.5時間)の計約1時間の加工時間に2倍以上短縮できる。 また, 電極レスとなるため, 短納期, 多品種製品への対応が可能となる. 本成果は, これまで取り 組んできた UPD 研削による超硬の溝加工の成果とともに, 加工能率を改善する有効な手段とな るといえる.

3-1-3 公立大学法人秋田県立大学 呉研究室

3年間にわたって実験装置の構築と予備実験、また側面研削や正面研削実験、そして溝加工 実験など難削材の UPD 研削特性の実験調査を進めた。得られた結果を次のように要約する。

- (1) 難削材の UPD(超音波援用プラズマ放電)研削に向けての予備実験として、チタン合金 (Ti-6Al-4V)とニッケル基耐熱合金(Rene 77)について超音波援用研削を施した。その結果、 慣用研削と比べ面粗さは35%(Ti-6Al-4V)と17%(Rene 77)程度向上し、実質切込み深さも 良好な値を示すことが明らかになった。
- (2) 超音波スピンドルとパルス電源システムを既設卓上型 3 軸加工機に付設することによって UPD 研削実験装置を構築した。炭素鋼(S45C)について低電圧での酸化現象と酸化層の 生成が確認され、酸化層のビッカース硬さが母材のそれより低いことから、構築した実験装 置の有用性が確かめられた。
- (3) 砥石の端面を使って切込み深さ 3µm で Ti-6Al-4V 試料の正面研削を行った結果、UPD 研 削では法線研削抵抗 F_n が慣用研削と比べ最大で 60%減少した。
- (4) Ti-6Al-4V の UPD 研削における砥石の半径摩耗量が慣用研削の4分の1程度に小さくなった。また慣用研削で砥粒の脱落が多いのに対し、UPD 研削で砥粒の破砕が多い。
- (5) Ti-6Al-4V の溝加工では、慣用研削と比べ UPD 研削の研削抵抗が半減し、材料の実除去 量も倍増して除去比率がほぼ 100%に達した。また、深さが 100µm の溝の創製加工では、 UPD 研削によって品位の高い溝が創製できた。
- (6) ニッケル基耐熱合金(Inconel 718)と超硬合金(F20)についても UPD 研削を試み、慣用研 削と比べると Inconel 718 の研削抵抗がわずか小さいが、F20 の研削抵抗が最大で 47%減 少したことが明らかになった。

3-1-4 国立大学法人東北大学大学院 厨川研究室

本研究では, 鋳鉄基材への放電表面処理を行い, 耐摩耗性, 摩擦特性について検討を行った.

当初、目標に揚げた、快削材である鋳鉄材料の放電加工においてチタン、シリコンを電極工具 からドーピングし、加工表面の硬度を2倍以上に高めることに成功した。また、モデル超音波放電 スピンドルの製作を終了、既存加工装置へ搭載終了しUPD研削加工装置としてシステムの構築 ができた。 さらに放電現象と改質効果の関係性について、処理時間を短時間にする、すなわち電極消耗 量を小さくした場合にも、電極元素のドーピング現象が確認され、表面の硬化、および摩擦係数 の低減の改質効果が得られ、本技術の実用に関わる砥石設計に極めて重要な知見を得た。

作製したチタンボンド砥石を用いて、処理層の Ti 原子数濃度が増加することを確認し、砥石の ドレッシングが行われ、砥石の研削作用維持が期待できる実用面での知見も得られたことから予 定通り目標を達成した。以下に結論を示す.

- (1) 単発放電痕の分析により、放電電流、パルス幅を増加させることで、単発痕径は増大することを確認し、また、処理面に炭素が濃化した陥没部が見られることを確認した。
- (2) 鋳鉄への処理面の摩擦係数測定により, TiC 処理, Si 処理ともに, 摩擦係数低減に有効で あると確認した.
- (3) 鋳鉄に放電表面処理を行うことで高硬度面形成が可能であり、また、TiC 処理面、Si 処理面 の比較により、TiC 処理が高硬度面形成により有効であると確認した.

3-2 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 厨川研究室の研究者各位、公立大学法人秋田県立大学呉研究室、山形県工業技術センター、 株式会社カナックの研究者各位、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、 冨士ダイス株式会社、多賀電気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。