

形彫放電加工機における 加工時間短縮に関する研究

電気加工研究室

指導教員 小林和彦

知能機械コース

1055075

和田 浩一

目次

第 1 章 形彫放電加工における最適加工条件の選定

1.1 緒言	5
研究背景	5
1.2 実験装置及び測定方法	6
1.3 加工深さと加工時間及び加工面粗さの関係についての調査研究	10
1.3.1 実験概要	10
1.3.2 加工条件	10
1.3.3 実験方法	12
1.3.4 実験結果	13
1.3.5 考察	15
1.4 各加工条件における加工深さと表面粗さの関係について	16
1.4.1 実験概要	16
1.4.2 実験方法	19
1.4.3 実験結果及び考察	19
最適加工条件の選定と実験結果	25
1.5 結論	28

第2章 放電・超高速回転ミーリングによる面性状の改善	29
2.1 緒言	29
1.1 従来の磨き作業について	31
2.2 実験装置及び測定方法	32
2.2.1 実験装置	32
2.2.2 実験装置接続図	38
2.2.3 6軸センサ概要	40
2.3 切り込み深さと残留放電痕の関係についての実験	45
2.3.1 実験概要	45
2.3.2 実験方法	45
2.3.3 実験結果	47
(1)放電荒加工面 15 $\mu\text{m/Ry}$ に対して加工を施した実験結果	47
・顕微鏡写真による実験結果	47
・表面粗さの実験結果	50
・センサによる Force/Torque の測定結果	51
・放電荒加工面 15 $\mu\text{m/Ry}$ における考察	55
(2)放電荒加工面 25 $\mu\text{m/Ry}$ に対して加工を施した実験結果	60
・顕微鏡写真による実験結果	60
・表面粗さの実験結果	63
・センサによる Force/Torque の測定結果	64
・放電荒加工面 25 $\mu\text{m/Ry}$ における考察	67
2.3.4 結言	71
2.4 放電面における超高速回転ミーリング最小切り込み量での最大ピク 量の選定	76
2.4.1 実験概要	76
2.4.2 実験方法	76
2.4.3 実験結果	78
(1)放電荒加工面 15 $\mu\text{m/Ry}$ に対して加工を施した実験結果	78
・顕微鏡写真による実験結果	78
・表面粗さの実験結果	81
・センサによる Force/Torque の測定結果	82
・放電荒加工面 15 $\mu\text{m/Ry}$ における考察	85

(2) 放電荒加工面 25 $\mu\text{m}/\text{Ry}$ に対して加工を施した実験結果	88
・顕微鏡写真による実験結果	88
・表面粗さの実験結果	92
・センサによる Force/Torque の測定結果	93
・放電荒加工面 25 $\mu\text{m}/\text{Ry}$ における考察	98
2.4.4 結言	102
2.5 加工パターンの変化と表面粗さについて	106
2.5.1 実験概要	106
2.5.2 実験方法	106
2.5.3 実験結果	107
2.5.4 結言	108
2.6 3次元形状による実験	109
2.6.1 実験概要	109
2.6.2 実験方法	109
2.6.3 実験結果	113
2.6.4 結言	114
2.7 結論	115
謝辞	117
参考文献・資料	118
付録	119
1. Force/Torque データ	119
2. エンドミルの加工距離と磨耗についての顕微鏡写真	125

第 1 章 形彫放電加工における最適加工条件の選定

1.1 緒言

研究背景

一般に形彫放電加工機の利用技術は、熟練と経験が必要とされ、ユーザの使い方の違いによって加工効率にかなりの差が出ると言われてきた。とくに加工条件は、加工深さとともに細かく変化させて選定するために、どのようにして加工条件を選定したらよいかについては、利用してまだ日が浅いユーザにとっては、なかなか理解できない難しい問題ということになる。そのため、たとえユーザの加工内容から見て若干不適当であっても、メーカーから与えられた一般的な加工条件を利用して加工を行う場合が通常である。それに加え形彫放電加工機の加工速度（単位時間当たりの工作物除去量）は、一般的に他の刃物を使用する切削加工に比べ遅いのがデメリットであり、最適な加工条件の選定は形彫放電加工機の加工時間短縮にも大きく関連するものである。

この加工条件の決定では、荒加工から仕上げ加工までの多段条件を加工精度を満足させ、かつ加工時間が最短になるように決定することが問題となる。この問題の解決には、多段階加工での加工工程が明確になっていなければならない。これまでの加工条件の最適化に関する研究として、岸は多段加工工程における加工特性について検討されているが¹⁾、最適化加工方法においては未だ確立していない。また、多段加工に対する最短加工条件は、加工段数と加工条件（荒加工から仕上げ加工までの加工面粗さの組合わせ）を同時に最適化しなければならないと述べている²⁾。

そこで、本研究では、メーカーから与えられた加工ノウハウに基づき、実際に加工を行いデータベース化することにより多段階加工条件を技術的に解明し、実際に加工する場合の加工条件の最適選定を目的とした研究である。上述したとおり、加工条件は加工深さに対して細かく加工条件を変化させる必要があり、かなりの熟練と経験を要する場合が多い。したがって、加工条件の選定を技術的に解明し、Technology としてとらえることは非常に意義があり、今後の形彫放電加工の利用技術の発展に大きく貢献するものと考えられる。

1.2 実験装置及び測定方法

(1)形彫放電加工機 三菱電機社製 VX10

本研究においては、図 1-1 に示す三菱製形彫放電加工機 VX10 を用いて行った。
また、同機の主な仕様を表 1-1 に示す。



図 1-1 形彫放電加工機の外観写真

表 1-1 形彫放電加工機 VX-10 の主な仕様

最小指令単位	0.1 μ m
最小駆動単位	0.1 μ m
駆動方式	AC サーボモーター
位置検出方式	ロータリーエンコーダー

本研究において、使用した加工条件は、形彫放電加工機 VX-10 に内蔵されている加工条件自動探索機能である ESPA³⁾を使用して加工条件を導きだした。加工条件自動探索機能の仕組みを図 1-2 に示す。図 1-2 において、入力データに仕上げ面粗さ、加工面積、加工深さなどの条件を入力し、また、優先度においては加工における優先度、例えば、速度重視や表面粗さ重視などがあげられるが、それらを入力するば、図に示した構造において、メーカーの加工ノウハウに基づき最適な加工条件が生成される仕組みである。

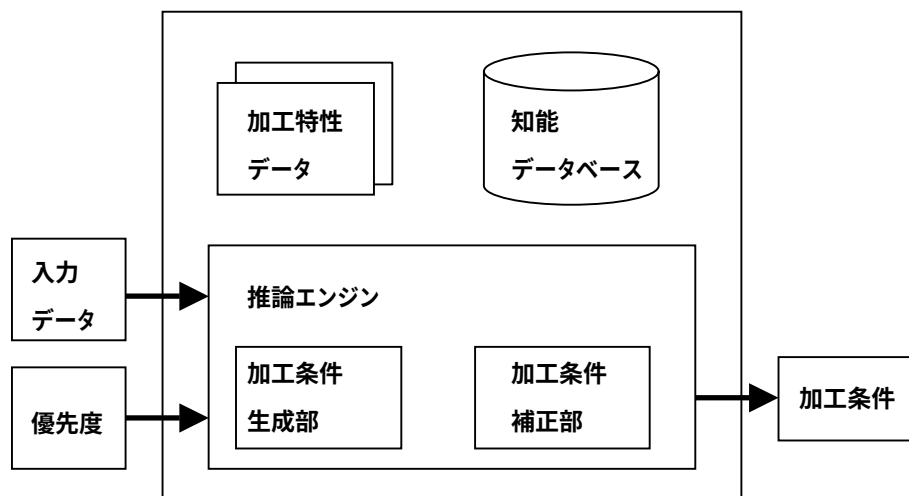


図 1-2 加工条件自動探索機能の仕組み

(2) 東京精密製 小型表面粗さ測定器 ハンディサーフ E - 30A

面粗さ測定器は図 1-3 で示した東京精密製、小型表面粗さ測定器 E - 30A を使用し、その仕様を表 1-2 に示す。



図 1-3 面粗さ測定器

表 1-2 面粗さ測定器 E - 30A の仕様

測定範囲	X 軸:12.5mm Z 軸:±160 μ m
変換器	差動インダクタンス方式
触針先端	ダイヤモンド 90°円錐 5 μ mR
測定力	4mN(0.4gf)以下
パラメータ(JIS)	Ra, Rmax, Ry, Rz, Rt, Rtm, Rpm, Pc

面粗さ測定器は、形彫放電加工後の加工表面の測定に用い、本章の研究においては Rmax を使用した。測定方法は図 1-4 に示したとおりであり、加工表面に対して 4 箇所を二度測定した。測定において、カットオフ値は、0.8mm で行い、測定長さは 4mm で行った。また、図に示した測定パターン①は、加工機手前側と定義して測定を行う。

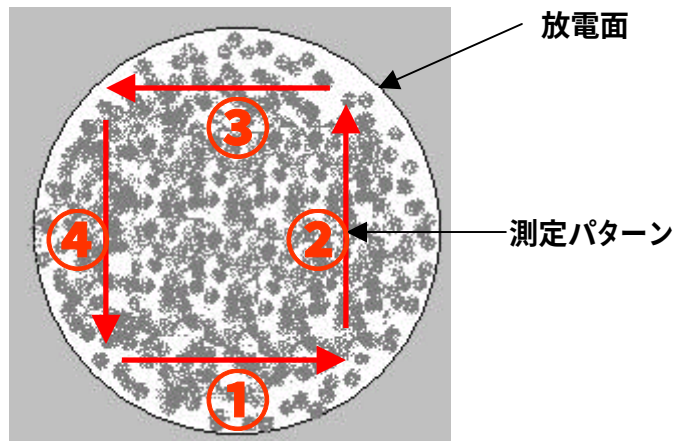


図 1-4 面粗さ測定パターン

(3) 測定顕微鏡 MITUTOYO TF-510F

形彫放電加工を施したワークに対して、図 1-5 に示す測定顕微鏡にて観察、及び測定を行った。この顕微鏡は 30～500 倍まで測定できる他に、測定機能を持っており、クロスゲージを利用して X 軸、Y 軸共に最小 1 μ m までの計測を行うことが可能である。また、機械上部にマイクロ・ネット社の NypixW マルチシステムを介在させることにより、NIKON coolpix950 を装着してデジタルカメラで画像を記録することが可能である。本実験では加工表面観察には 500 倍の倍率を用いた。同機的主要仕様を表 1-3 に示す。

表 1-3 測定顕微鏡の仕様

形式	支柱直立型
接眼鏡筒	30 °
対物レンズ倍率	×3、×10、×50
接眼レンズ倍率	×10
透過照明装置	反射照明装置
測定最小寸法	1 μ m
接続用アタッチメント	マイクロ・ネット社製 NypixW マルチシステム 00201
記録用デジタルカメラ	NIKON COOLPIX 950



図 1-5 測定顕微鏡の外観写真

1.3 加工深さと加工時間及び加工面粗さの関係について

1.3.1 実験概要

形彫放電加工機 VX10 の制御装置に内蔵されている、加工条件自動探索機能(以下 ESPA と略称)の推奨加工条件を使用して実際に加工を行い、その際の加工時間に対する加工深さおよび加工面粗さの変化を調査する。

1.3.2 加工条件

加工条件は、加工深さに応じて、加工条件と揺動条件を変化させて加工を行う、いわゆる多段階加工の条件を上述した ESPA によって求めた。また、ESPA 内のパラメータである面粗さ重視と加工速度重視の 2 種類の加工条件を求め使用した。それぞれの加工条件を表 1-4 と表 1-5 に示す。

表 1-4 面粗さ重視の加工条件表

電気条件	4753	4754	4755	4756	4757	4758	4759	4760
回路選択	SC	SC	TP	TP	TP	TP	GM	GM
補助電源	4	4	0	0	0	0	0	0
極性切換	+	+	+	+	+	+	—	—
加工セッティング	4.2	2.3	1.5	1.3	1.2	0.2	1.2	1.2
パルス幅	8.6	6.5	6.0	4.0	2.0	1.0	0.1	0.1
休止時間	10.5	5.0	4.0	4.0	2.0	2.0	0.4	0.4
F 回路	0	10	10	13	15	13	13	13
放電安定	1	1	1	1	1	1	1	1
上昇距離	4	3	3	3	3	3	4	4
降下時間	1	1	1	1	1	1	3	3
コンデンス切換	0	0	0	0	0	0	0	0
加工調整	80	80	70	60	60	60	50	50
サーボ電圧	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
OP 感度	8	8	8	8	8	8	8	8

表 1-5 加工速度重視の加工条件表

電気条件	4817	4818	4819	4820	4821	4822	4823	4824
回路選択	SC	SC	TP	TP	TP	TP	GM	GM
補助電源	4	4	0	0	0	0	0	0
極性切換	+	+	+	+	+	+	—	—
加工セッティング	4.2	2.3	1.5	1.3	1.2	0.2	1.2	1.2
パルス幅	8.6	6.5	6.0	4.0	2.0	1.0	0.1	0.1
休止時間	10.5	4.0	4.0	4.0	2.0	2.0	0.4	0.4
F 回路	0	10	10	13	15	13	13	13
放電安定	1	1	1	1	1	1	1	1
上昇距離	4	3	3	3	3	3	4	4
降下時間	1	1	1	1	1	1	3	3
コンデンサ切換	0	0	0	0	0	0	0	0
加工調整	80	80	70	60	60	60	50	50
サーボ電圧	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
OP 感度	8	8	8	8	8	8	8	8

電気条件として E 番号が振り当てられており、これはメーカーで規定されている様々な電気条件の組み合わせである。加工段階が進むにつれて電気条件が弱まる方向になっている。

また、加工深さ(Z)と揺動半径(R)の各加工段階における設定値は、それぞれ表 1-6、表 1-7 に示す。また、このときの揺動パターンは、円モードであり、加工途中はスパイラルに Z と R を変化させる方式である。

表 1-6 面粗さ重視の各段階における加工深さ Z と揺動半径 R の設定値 [Z,R:mm]

加工段階	1	2	3	4	5	6	7	8
絶対移動 Z	-0.161	-0.367	-0.411	-0.433	-0.452	-0.473	-0.492	-0.522
揺動半径 R	0.333	0.494	0.533	0.550	0.563	0.578	0.595	0.555
揺動パターン D	200							
電気条件 E	4753	4754	4755	4756	4757	4578	4579	4760

表 1-7 加工速度重視の各段階における加工深さ Z と揺動半径 R の設定値 [Z,R:mm]

加工段階	1	2	3	4	5	6	7	8
絶対移動 Z	-0.251	-0.401	-0.433	-0.449	-0.463	-0.478	-0.492	-0.522
揺動半径 R	0.405	0.522	0.550	0.562	0.572	0.583	0.595	0.555
揺動パターン D	200							
電気条件 E	4817	4818	4819	4820	4821	4822	4823	4824

表 1-6 と表 1-7 を見てわかるように加工速度重視の方の加工取り代は、面粗さ重視のそれに比べて、荒、中加工段階で少しでも深く加工して加工時間の短縮を狙っていることが分かる。

1.3.3 実験方法

実験に使用した電極は、図 1-6 に示すようなφ12mm の円筒形の銅(Cu)を用い、ワーク材料は、S50C と SK-5 の 2 種類を用いた。実験は、前述した速度重視及び、面粗さ重視の 2 種類の加工条件で加工を行い加工時間 60sec に一度、加工機のモニターから加工深さ(Z)の値をプロットする。また、各加工段階ごとに加工をストップさせ各加工段階終了時の加工面粗さを面粗さ計 E-35A を用い加工面を 4 パターン測定しその平均を求めた。また、各加工開始時において、銅電極底面を#1500 の耐水ペーパーで磨き、各加工開始時においての電極の面粗さを一定とした。



図 1-6 銅電極写真

1.3.4 実験結果

実験結果を以下に示す。まず、ワーク材料として S50C の場合の面粗さ重視および加工速度重視の場合の、加工時間に対する加工深さおよび面粗さとの関係を図 1-7、図 1-8 にそれぞれ示す。

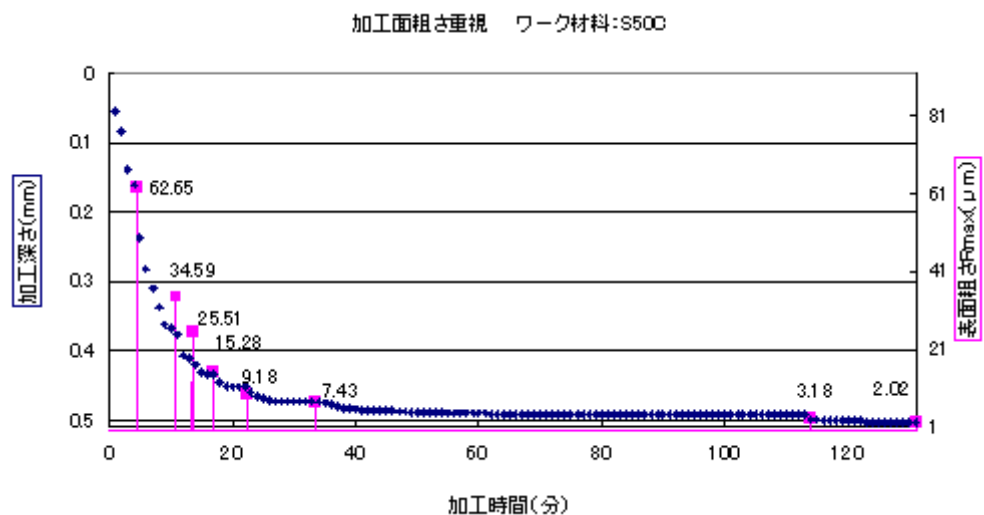


図 1-7 加工時間に対する加工深さおよび面粗さの関係

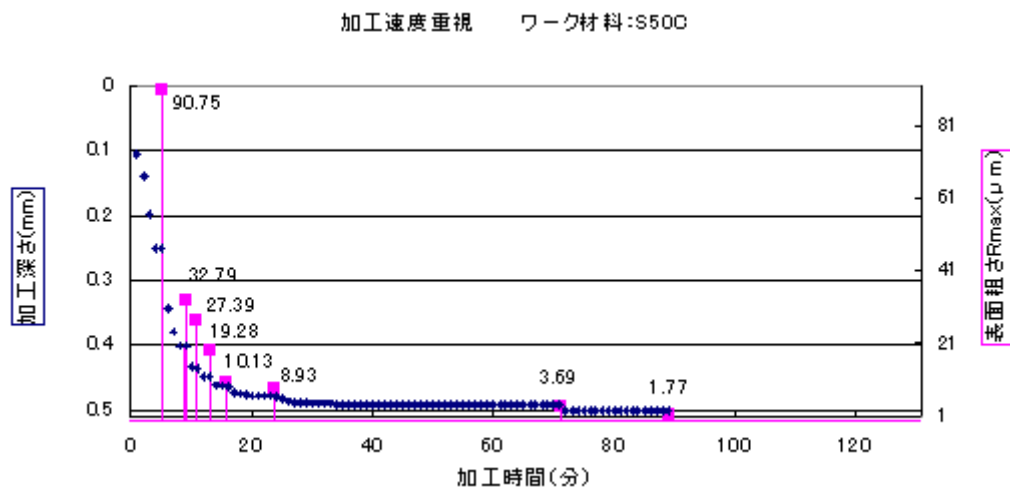


図 1-8 加工時間に対する加工深さおよび面粗さ

さらに、ワーク材料が SK-5 の場合の加工速度重視に対応した実験結果を、図 1-9 に示す。また、SK-5 においては、加工深さと加工時間の関係をより詳しく知るために加工深さのプロット時間を 5sec に一度とし示す。

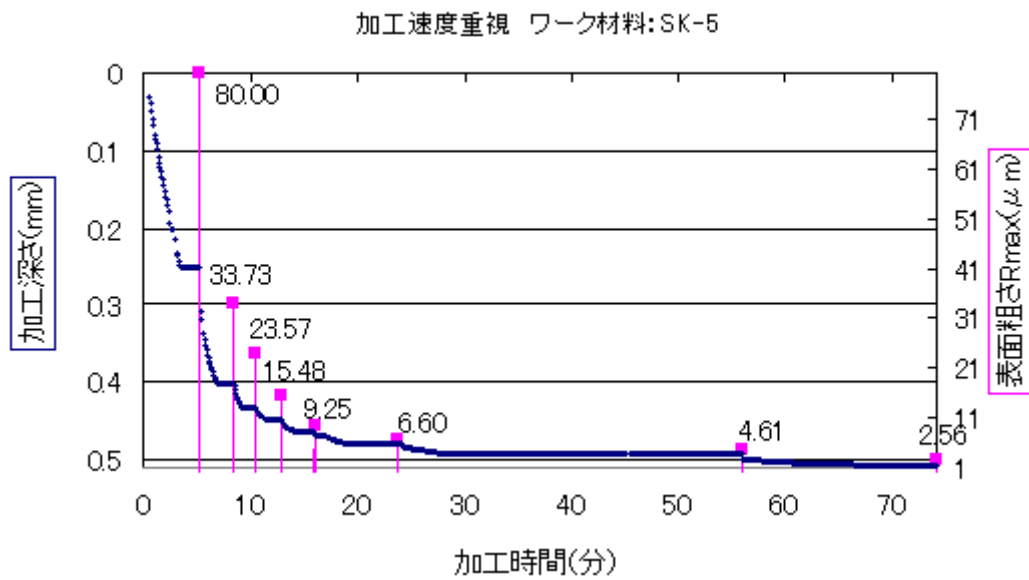


図 1-9 加工時間に対する加工深さおよび面粗さ

1.3.5 考察

まず、図 1-7 と図 1-8 においてのワーク材料 S50C においての加工面粗さ重視と加工速度重視とでは、最終での面粗さがほとんど同一にもかかわらず、最終加工時間の比較で非常に大きな差があることが分かる。次に、図 1-8 と図 1-9 においての加工速度重視でのワーク材料の違いにおいて比較してみると S50C に比べ SK-5 のほうが若干最終加工時間が短いことが言えるが、この程度の長時間加工を考慮すると、ほとんど差がないと見るができる。また、全体の加工時間を見ると荒、中加工時間が全体の 1/3、仕上げ段階の加工時間が 2/3 を占めていることがそれぞれのグラフにおいて言える。

図 1-7 と図 1-8 において荒、中加工時間を比較すると加工面粗さ重視の方が、およそ 34 分で、加工速度重視の方が、およそ 23 分であり、荒、中加工で少しでも加工代ろを深く設定している加工面粗さ重視のほうが加工時間が短縮されているといえる。すなわち、荒、中加工段階において最終加工深さに対してどこまで加工深さを深く追い込んでいけるかが、荒、中加工段階の時間短縮となりその結果、仕上げ加工においての加工深さが少なくなり、仕上げ段階においての加工時間短縮につながると考えられる。本実験での加工速度重視と加工面粗さ重視のそれぞれの各段階における加工深さの比較を表 1-8 に示す。

表 1-8 加工面粗さ重視と加工時間重視の各段階における加工深さ(Z)の加工値[mm]

加工段階	1	2	3	4	5	6	7	8
加工面粗さ重視	0.161	0.206	0.044	0.022	0.019	0.021	0.019	0.030
加工速度重視	0.251	0.150	0.032	0.016	0.014	0.015	0.014	0.030

次に、各加工段階について見ると、各加工段階の加工深さ設定値に達したのちに加工深さがフラットになっている部分が見られる。これは、電極が揺動運動しながら加工をしているため、電極のある一点が加工深さ設定値に達したのち揺動運動により面を均一にしているものと考えられる。また、この揺動運動に費やしているグラフのフラットの部分が意外に無視できない程度の時間がかかっていることが分かる。とくに、仕上げ段階においては、この部分の時間が 8 割程度、荒、中加工においても 1/3 から 1/2 程度費やしていることが分かる。このことにより、揺動も加工時間に大きく関わっていることが分かる。

1.4 各加工条件における加工深さと表面粗さの関係について

1.4.1 実験概要

3 節の実験において使用した多段階式の加工条件をもとに、各加工段階における加工深さと表面粗さの関係を調査する。実験は、荒加工で仕上げ加工深さに対して多く加工深さを設定している速度重視の設定を使用し、荒加工における各段階の加工深さと表面粗さについて測定を行うものとする。すなわち、荒加工における最適な加工条件の選定を目的とするものである。

1.4.2 実験方法

実験に使用する加工条件は、3 節の実験において使用した、加工条件自動探索機能を使用した速度重視で表 1-9 に示す。また、電極においても 3 章の実験で使用した銅電極を使用し、ワーク材料は、SK-5 を使用する。

表 1-9 加工速度重視の各段階における加工深さ Z と揺動半径 R の設定値 [Z,R:mm]

加工段階	1	2	3	4	5	6	7	8
絶対移動 Z	-0.251	-0.401	-0.433	-0.449	-0.463	-0.478	-0.492	-0.522
揺動半径 R	0.405	0.522	0.550	0.562	0.572	0.583	0.595	0.555
揺動パターン D	200							
電気条件 E	4817	4818	4819	4820	4821	4822	4823	4824

表 1-9 において荒加工である加工段階 1～6 において表 1-10～表 1-14 に示すような実験条件を定め、実験を行った。

表 1-10 第 2 段階における測定設定値[Z,R:mm]

加工段階	1	2
絶対移動 Z	-0.251	∞
揺動半径 R	0.405	0.522
揺動パターン	200	
電気条件 E	4817	4818

表 1-11 第 3 段階測定方法 1 における測定設定値[Z,R:mm]

加工段階	1	2	3
絶対移動 Z	-0.251	-0.401	∞
揺動半径 R	0.405	0.522	0.550
揺動パターン	2 0 0		
電気条件 E	4 8 1 7	4 8 1 8	4 8 1 9

表 1-12 第 4 段階測定方法 1 における測定設定値[Z,R:mm]

加工段階	1	2	3	4
絶対移動 Z	-0.251	-0.401	-0.433	∞
揺動半径 R	0.405	0.522	0.550	0.562
揺動パターン	2 0 0			
電気条件 E	4 8 1 7	4 8 1 8	4 8 1 9	4 8 2 0

表 1-13 第 5 段階測定方法 1 における測定設定値[Z,R:mm]

加工段階	1	2	3	4	5
絶対移動 Z	-0.251	-0.401	-0.433	-0.449	∞
揺動半径 R	0.405	0.522	0.550	0.562	0.572
揺動パターン	2 0 0				
電気条件 E	4 8 1 7	4 8 1 8	4 8 1 9	4 8 2 0	4 8 2 1

表 1-14 第 6 段階測定方法 1 における測定設定値[Z,R:mm]

加工段階	1	2	3	4	5	6
絶対移動 Z	-0.251	-0.401	-0.433	-0.449	-0.463	∞
揺動半径 R	0.405	0.522	0.550	0.562	0.572	0.583
揺動パターン	2 0 0					
電気条件 E	4 8 1 7	4 8 1 8	4 8 1 9	4 8 2 0	4 8 2 1	4 8 2 2

表 1-10～表 1-14 を見て分かるとおり多段階加工において各段階から順当に加工を行っていき任意に定めた加工段階において、加工深さを基本的に無限大と仮定し、次の加工段階にステップせずに加工を進めていくものとする。また、測定は加工深さ無限大と仮定した加工段階において、加工深さ $10\ \mu\text{m}$ おきに加工をストップさせ表面粗さを測定し、測定後、加工を再スタートさせた。測定は、加工深さに対して表面粗さが約一定となったと思われる時点、つまり、測定加工段階における電気条件で最小の表面粗さになったと思われる時点で測定を終了した。

1.4.3 実験結果及び考察

第2段階～第6段階における実験結果をそれぞれ図 1-10～図 1-14 に示す。

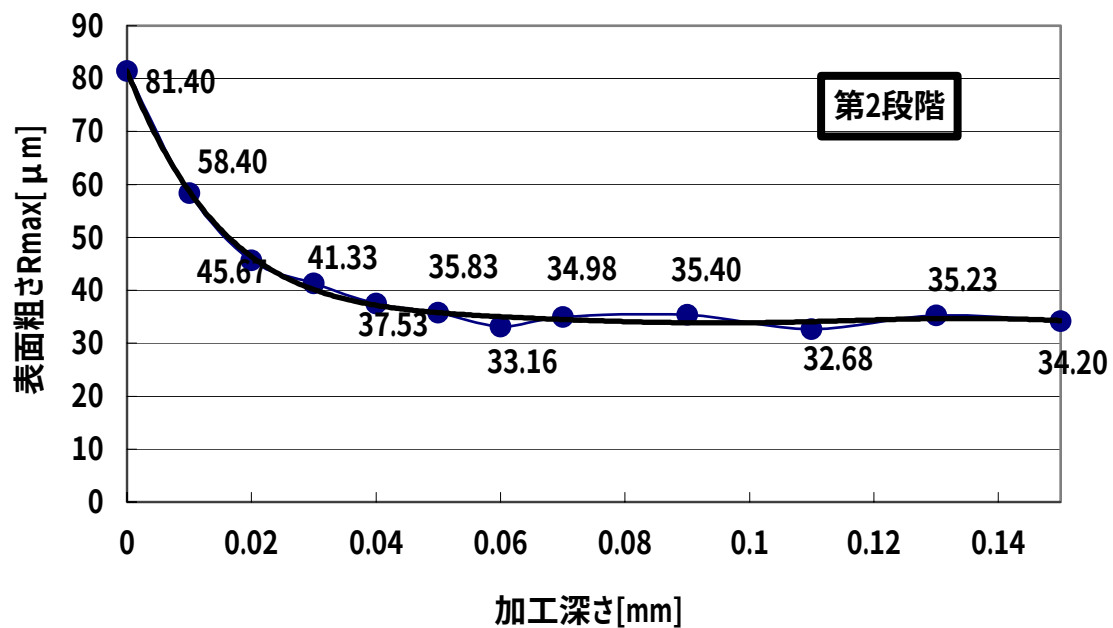


図 1-10 第2段階における加工深さと表面粗さの関係

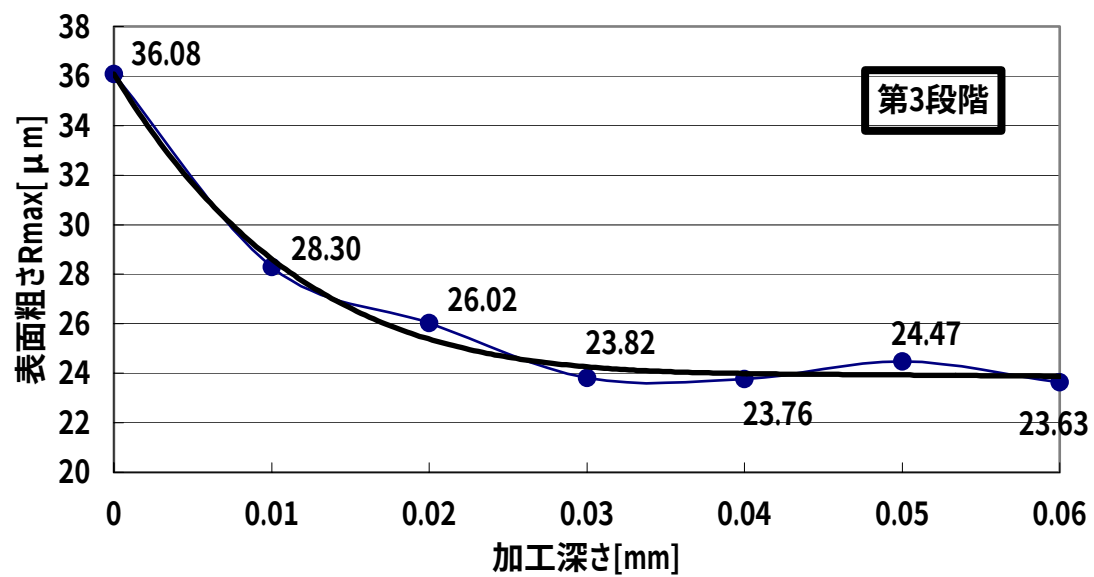


図 1-11 第3段階における加工深さと表面粗さの関係

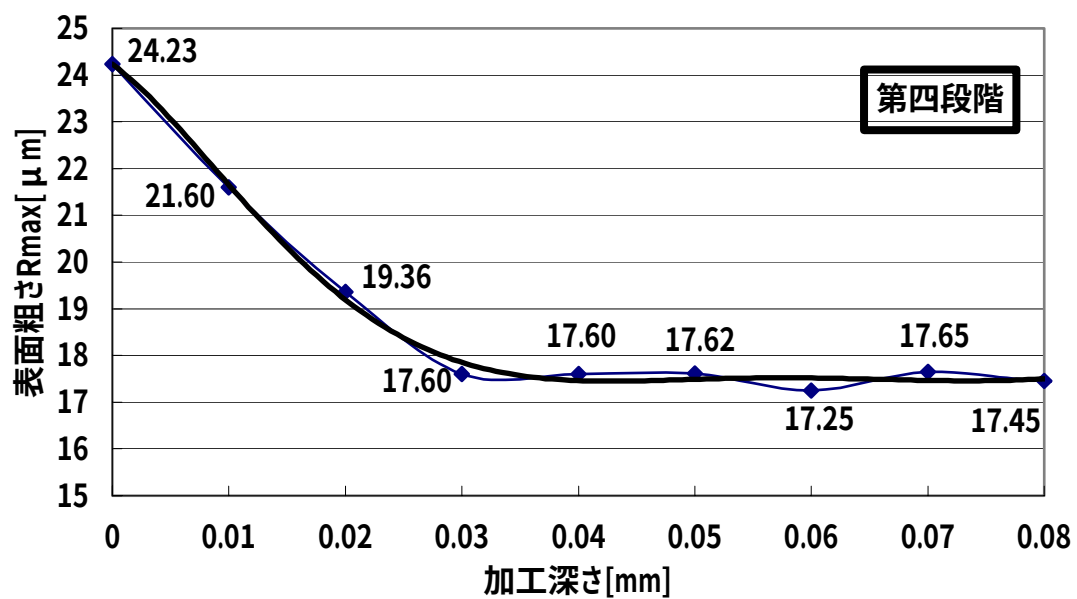


図 1-12 第 4 段階における加工深さと表面粗さの関係

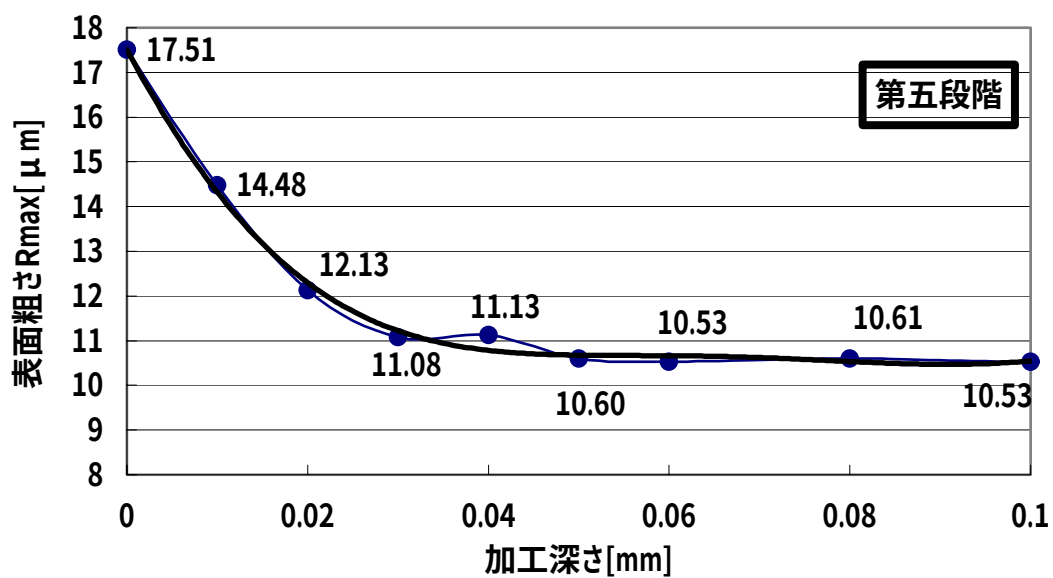


図 1-13 第 5 段階における加工深さと表面粗さの関係

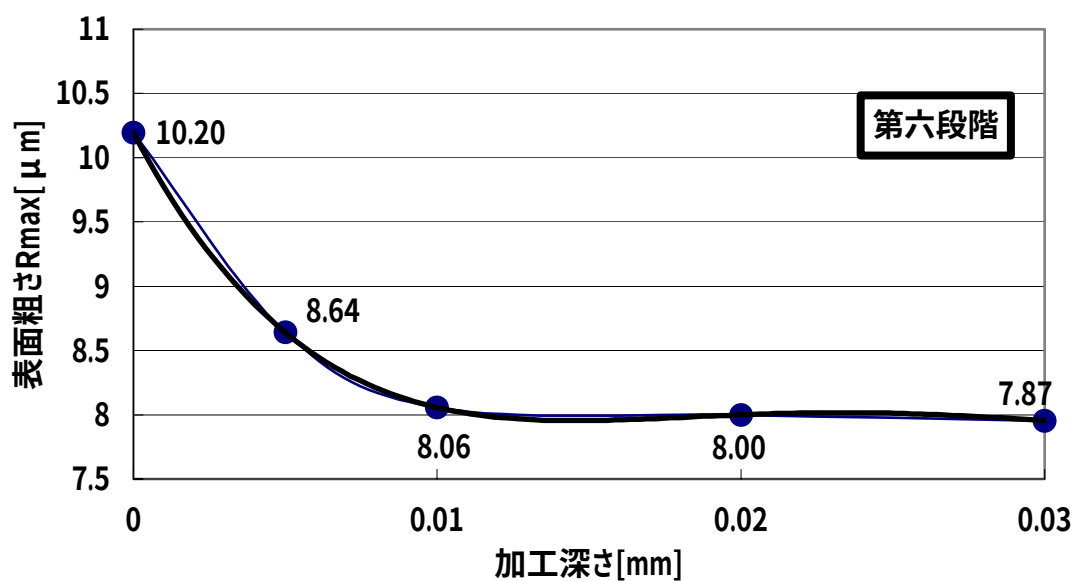


図 1-14 第 6 段階における加工深さと表面粗さの関係

図 1-10～図 1-14 のグラフをみてわかるように、加工深さの増加とともに表面粗さが低下していき、ある加工深さに到達すると、それ以降は加工深さの増加に依存せずおよそ一定の表面粗さを保ちながら加工を進めていく結果となっている。表面粗さが一定となるまでの加工深さと表面粗さの関係を表 1-5 に示す。

表 1-15 加工深さと最小面粗さの関係

加工段階	表面粗さ一定となるまでの加工深さ[μ m]	表面粗さ一定となるまでの表面粗さの差[μ m/Rmax]
第 2 段階	50	46.90
第 3 段階	30	12.16
第 4 段階	30	6.70
第 5 段階	30	6.43
第 6 段階	10	2.22

表 1-15 より第四段階と第五段階においては、加工深さと表面粗さの差にほとんど差がない結果となったが、全体からみると加工段階が進むにつれて、表面粗さが一定になるまでの加工深さは減少する結果となり、また $10\mu\text{m}$ あたりの表面粗さの改善率も悪くなっていていることがわかる。これは、加工段階が進むにつれて放電エネルギーが減少する設定となっているためであるが、本実験により各段階における加工深さと表面粗さとの関係がグラフ化できたことになる。また、測定は $10\mu\text{m}$ （第六段階においては $5\mu\text{m}$ ）おきに測定を行ったが、グラフにおける測定点を 6 乗近似方程式で近似し、図IV-1～図IV-5 のグラフに表示した。本実験での実験結果をみて分かるように、各段階における初段階においては加工深さに対して表面粗さが減少するが、加工深さがある深さに到達後、表面粗さは一定となる。そのためグラフに示したような特徴的な傾向のグラフとなり、近似に関しては 6 乗近似が最も適していると考えられ、それを適応した。図 1-10～図 1-14 に示した 6 乗近似の方程式をそれぞれ表 1-16 に示す。

表 1-16 各加工段階における近似方程式

加工段階	近似方程式
第 2 段階	$y = 6.511 \times 10^7 x^6 - 3.958 \times 10^7 x^5 + 9.604 \times 10^6 x^4 - 1.195 \times 10^6 x^3 + 8.154 \times 10^4 x^2 - 2.975 \times 10^3 x + 81.4$
第 3 段階	$y = 8.799 \times 10^6 x^6 - 1.816 \times 10^7 x^5 + 5.222 \times 10^6 x^4 - 6.186 \times 10^5 x^3 + 3.626 \times 10^4 x^2 - 1.052 \times 10^3 x + 36.08$
第 4 段階	$y = -4.428 \times 10^8 x^6 + 1.350 \times 10^8 x^5 - 1.546 \times 10^7 x^4 + 7.909 \times 10^5 x^3 - 1.407 \times 10^4 x^2 - 1.828 \times 10^2 x + 24.23$
第 5 段階	$y = -4.020 \times 10^7 x^6 + 1.381 \times 10^7 x^5 - 1.483 \times 10^6 x^4 + 2.083 \times 10^4 x^3 + 6.069 \times 10^3 x^2 - 3.806 \times 10^2 x + 17.51$
第 6 段階	$y = -2.281 \times 10^9 x^6 + 1.875 \times 10^8 x^5 + 4.508 \times 10^6 x^4 - 8.794 \times 10^5 x^3 + 3.153 \times 10^4 x^2 - 4.473 \times 10^2 x + 10.2$

本実験で求めた結果を、前節で示した加工条件自動探索機能を用いて加工を行った加工速度重視の結果と比較し、図 1-15 と図 1-16 に示した。図 1-15 は、第 2 段階における加工速度重視の結果を示し、同グラフ中に本章で求めた実験結果を合わせて表示した。第 2 段階での加工深さは、設定値 $150\text{ }\mu\text{m}$ であるがグラフをみてわかるように第 2 段階における加工条件では、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以降では、表面粗さは一定のまま加工していることがわかる。つまり、この段階での最良の表面粗さに到達しているにもかかわらず、同条件での加工を続けていることになる。同様に図 1-16 に示した第 3 段階においても同様のことがいえるが前者のものに比べるとその割合は、短いものとなっている。逆に、第 4 段階と第 5 段階においては、その段階における最良の表面粗さになる前に、次の段階に切り替わっている。それらの関係を表 1-17 に示す。

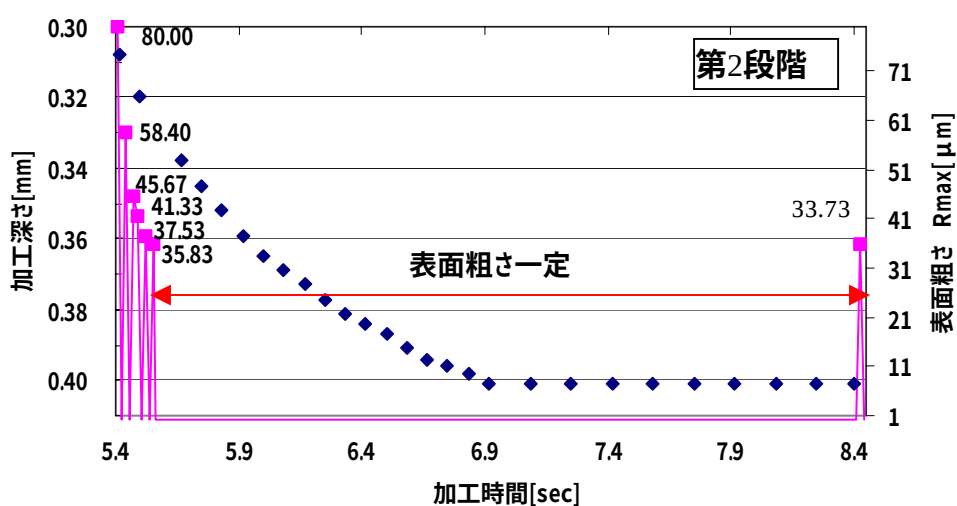


図 1-15 速度重視の第 2 段階における最小面粗さの関係

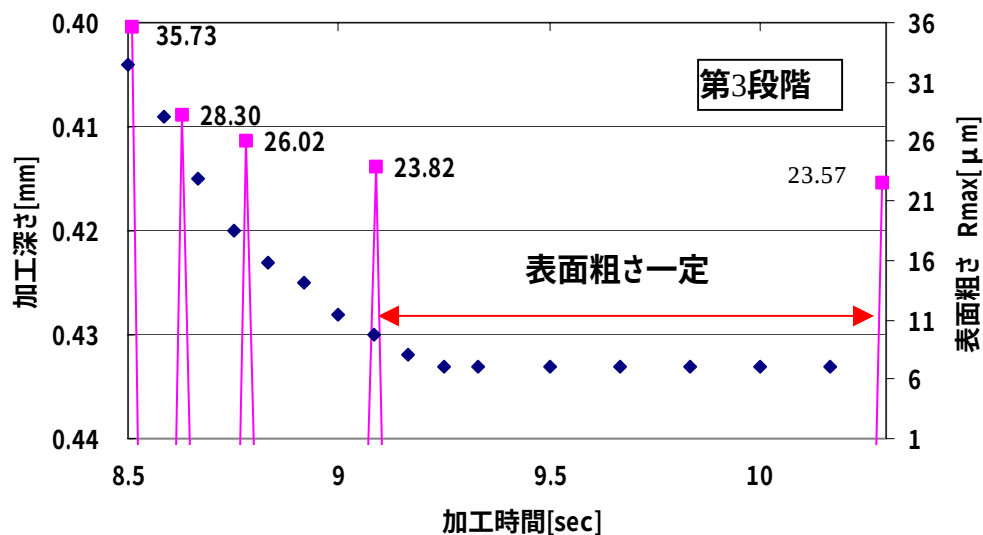


図 1-16 速度重視の第 3 段階における最小面粗さの関係

表 1-17 ESPA 条件と本実験結果との各段階における加工深さ(Z)の加工値[μm]

加工段階	1	2	3	4	5	6	7	8
加工面粗さ重視	161	206	44	22	19	21	19	30
加工速度重視	251	150	32	16	14	15	14	30
表面粗さ一定となるまでの加工深さ	-----	50	30	30	30	10	-----	-----

表 1-17 で示したとおりまず加工面粗さ重視と加工速度重視を比較して、第 1 段階での追い込みが加工速度重視の方が多くなっているのがわかる。多段階加工の加工段階においては加工段階の初めから終わりにかけて順当に放電エネルギーが減少するため、加工段階の初期、つまり加工速度の早い段階において、できるだけ仕上げ加工深さに近いところまで追い込んでおくほうが、加工時間は短くなるといえる。しかし、放電エネルギーの大きい段階において、仕上げ加工深さぎりぎりまで追い込んでしまうのは、強い放電によって仕上げ加工深さよりも深く加工がおよんでしまう可能性がある。そのため、適量なマージンを設けて加工深さを追い込む必要がある。

最適加工条件の選定と実験結果

そこで、本実験結果を用い前述したような表面粗さが一定になったにもかかわらず加工段階をステップせずに加工している段階において表 1-17 の数値を基に、加工条件を変更し加工を行った。加工条件は、表 1-18 に示す。

表 1-18 ESPA 加工速度重視と最適化条件の加工条件の比較 [mm]

加工段階	1	2	3	4	5	6	7	8
加工速度重視	-0.251	-0.401	-0.433	-0.449	-0.463	-0.478	-0.492	-0.522
パターン1 (0%)	-0.358	-0.408	-0.438	-0.454	-0.468	-0.478	-0.492	-0.522
パターン2 (10%)	-0.350	-0.405	-0.438	-0.454	-0.468	-0.478	-0.492	-0.522
パターン3 (20%)	-0.342	-0.402	-0.438	-0.454	-0.468	-0.478	-0.492	-0.522

表 1-18 は、本実験の実験結果をもとに、加工速度重視をベースに荒加工段階の加工深さを最適化した加工条件である。パターン 1～パターン 3 までの 3 とおりの加工条件を作成しそれぞれの括弧内に示したパーセントは、その段階での加工深さに対するマージンでありパターン 1 では、マージンなしで加工を行い、その段階での最小の表面粗さになった時点で次の段階にステップした。なお、マージンの適応は荒加工段階の中でも初期の段階、つまり放電エネルギーの大きい段階であり、今回は第二段階及び第三段階にのみ適応した。

また、第四段階及び第五段階においては、加工速度重視での加工深さはそれぞれ $16\mu\text{m}$ 及び $14\mu\text{m}$ と設定されているが、この値は、本実験より求めた最小表面粗さまでの加工深さ $30\mu\text{m}$ よりも小さな値のため、この二つの段階では加工速度重視の設定値を用いた。

パターン 1、2、3 の加工条件で実際に加工を行い、その結果を以下に示す。表 1-19 にそれぞれの加工時間を示し、そのグラフを図 1-17 に示す。また、荒加工（段階 1～6）と仕上げ加工（段階 7）に分類し、加工速度重視を基準として、それぞれの加工条件の短縮率(%)を表 1-20 に示す。

表 1-19 各加工時間における加工時間の実験結果

加工段階	1	2	3	4	5	6	7	8	合計
加工速度重視	5 分 6 秒	3 分 49 秒	1 分 55 秒	2 分 48 秒	2 分 58 秒	11 分 8 秒	33 分 43 秒	18 分 1 秒	79 分 27 秒
パターン1 (0%)	8 分 30 秒	1 分 47 秒	1 分 41 秒	2 分 22 秒	2 分 32 秒	3 分 9 秒	15 分 19 秒	18 分 1 秒	53 分 21 秒
パターン2 (10%)	7 分 4 秒	1 分 45 秒	1 分 49 秒	2 分 28 秒	2 分 42 秒	2 分 38 秒	15 分 57 秒	18 分 1 秒	52 分 24 秒
パターン3 (20%)	7 分 37 秒	1 分 53 秒	1 分 59 秒	2 分 43 秒	3 分 19 秒	3 分 1 秒	21 分 8 秒	18 分 1 秒	59 分 41 秒

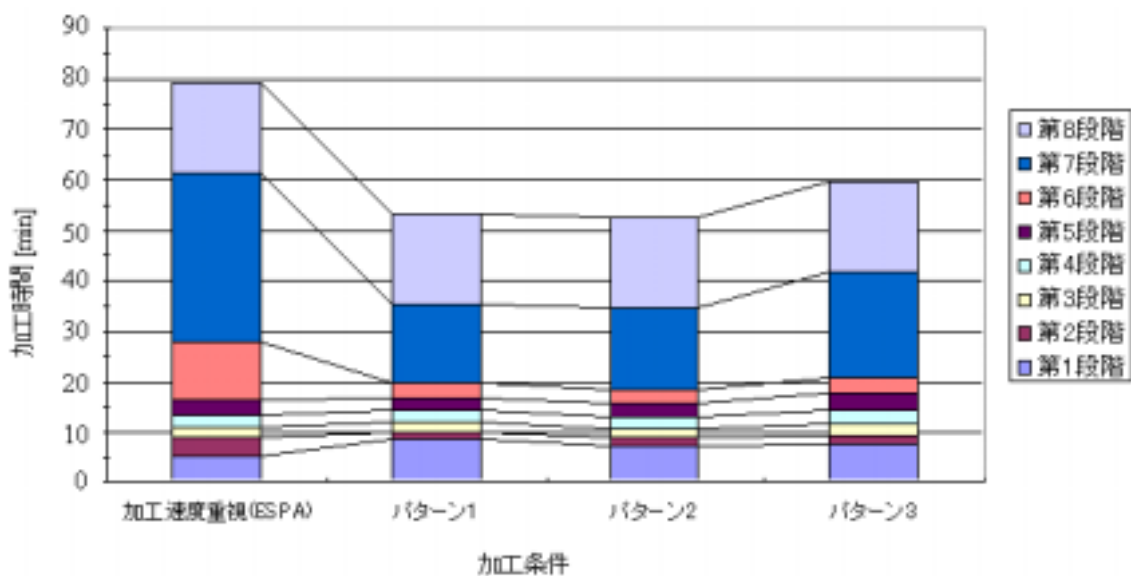


図 1-17 各加工条件の加工時間比較

表 1-20 各加工条件における短縮率 [%]

加工条件	荒加工 (段階 1~6)	仕上げ加工(段階 7)
パターン 1 (0%)	27.8	54.6
パターン 2 (10%)	33.5	52.7
パターン 3 (20%)	26.0	37.3

表 1-19 にそれぞれの加工条件における加工時間を示し図 1-17 にグラフを示したが、加工条件自動探索における加工速度重視をベースとし、今回設定した加工条件パターン 1～パターン 3 において比較したところ、まずベースの加工条件から本実験結果を用いて変更した段階、つまり第 2 段階・第 6 段階においては加工時間は短縮されていることがわかる。また、第一段階の加工条件の変更は、ベースの加工条件より加工深さを深く設定しているため、当然加工時間は増えた結果となる。しかし、全体加工のおよそ 2/3 を占めていた仕上げ加工 7 段階目においては、加工条件は、ベースの加工速度重視と変更を行っていないにもかかわらず加工時間がおよそ 2/3 から 1/2 になっていることがわかる。これは、表 1-20 をみてもわかるように荒加工段階よりも仕上げ段階のほうが加工時間短縮率がよい結果となった。この結果については、現段階においてははっきりとした結論はできないが、考えられる要因としてあげられるものは、荒加工段階において仕上げ加工深さに対してぎりぎりまで追い込んだ加工条件から、加工効率にかかわるスラッジの付着量が仕上げ段階において少なくなったことなどが考えられる。そのため、マージンが増す加工条件になる程、7 段階における加工時間は徐々に増加しているものと推測ができる。今後、仕上げ加工におけるスラッジの量を測定することで明らかになると考えられる。

次に、加工条件パターン 1～パターン 3 における加工面の顕微鏡写真($\times 500$)を図 1-18～図 1-20 に示す。

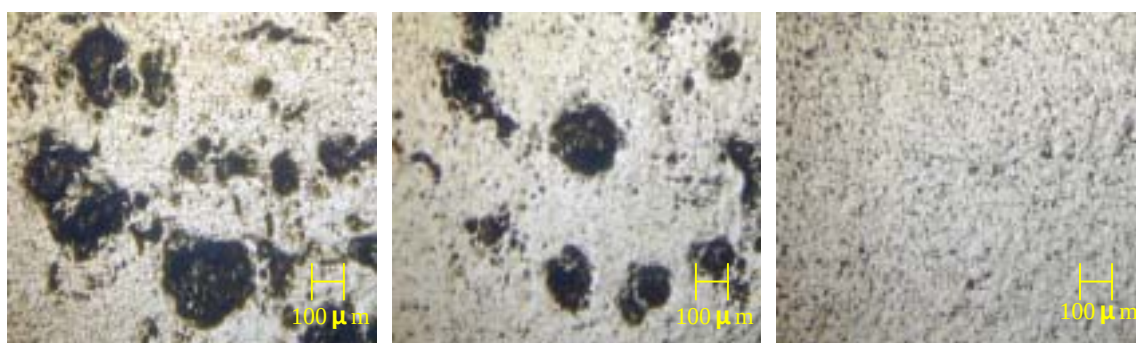


図 1-18 パターン 1 (0%) 図 1-19 パターン 2 (10%) 図 1-20 パターン 3 (20%)

図をみて明らかなように、荒加工初段階（段階 2 及び 3）においてマージンを設けていない加工パターン 1 においては、加工面に肉眼でも確認できるくらいのクレーターが存在しこれは、初段階における放電エネルギーが強いため仕上げ加工深さよりも深く加工がおよんでしまった結果だといえる。また、図 1-19 のマージンを段階の加工深さに対して 10% だった場合においても、マージンなしのクレーターよりは、若干小さいものの数多くのクレーターが確認できた。次に、マージンを 20% 設けたパターン 3 においては、加工面に前者のようなクレーターが確認できず、仕上げ加工深さおりの加工が実現できたといえる。また、パターン 3 での表面粗さは $2.17 \mu\text{m}/R_{\text{max}}$ であり加工速度重視の $2.56 \mu\text{m}/R_{\text{max}}$ とほぼ同等な結果が得られたといえる。

1.5 結論

形彫放電加工機における加工条件自動探索装置 ESPA をデータ化することで、総加工時間のおよそ 2/3 は、仕上げ加工が占めていることがわかり、また、ESPA による加工条件である加工面粗さ重視と加工速度重視を比較することにより、最終の表面粗さに違いがなく加工時間は、後者の方が短いということから多段階加工においては、荒加工段階での仕上げ加工深さに対する追い込みが重要な要素であり、つまり仕上げ段階においていかに加工深さを減らすかが加工時間に大きく関わるということがわかった。

次に、各加工段階における加工深さと表面粗さの実験において、各加工段階での最小の表面粗さ、及びそれに到達するまでの加工深さが明確となり、また、6 乗近似方程式により、その関係を数式化することができた。

このことにより、ESPA での加工速度重視の加工条件を見直し、荒加工段階においての最適化加工条件を選定し、実験を行った結果、荒加工段階及び仕上げ段階において加工時間が短縮された結果となった。また、加工仕上げ深さに対しての荒加工での安全マージンも明確となり、その値は、その加工段階における加工深さのおよそ 20% をマージンととる必要がある。その結果、ESPA での加工表面粗さと同等の表面粗さが得られ総加工時間は、およそ 24.9% 短縮された。

また、今後の課題として以下に示す。

1. 加工深さと加工時間及び加工面粗さの関係の実験により、各段階の終了段階において揺動による加工底面を一定する時間が、その段階の加工時間は仕上げ段階においてが割程度、荒加工においても 1/3 から 1/2 程度費やしていることが分かった。すなわち、加工条件の最適化及び加工時間短縮にこの時間は、大きな要因であり、揺動においても最適化が必要であると考えられる。
2. 今回の実験では、荒加工段階における初段階のみを変更し加工を行ったが、荒加工段階全体における、加工条件の最適化を、本実験により求めた各段階の 6 乗近似方程式を用い、モンテカルロ法などの手法により、より最適な加工条件を検討する。
3. 本実験において荒加工段階の初段階における最適化を行ったが、これにより仕上げ段階における、加工時間も短縮された。このことに関するメカニズムを明白とする必要があり、仕上げ加工深さに対して荒加工でぎりぎりまで追い込むことによる、仕上げ加工に及ぼす影響を調査・検討する。

第2章 放電・超高速回転ミーリングによる面性状の改善

2.1 緒言

第1章において形彫放電加工における最適加工条件の選定における加工時間短縮について述べたが、本章においては、更なる加工時間短縮を目的とした加工法について研究を行うものである。第1章で述べたとおり、形彫放電加工の加工時間のおよそ2/3は仕上げ加工に費やしている。そこで、本研究では、最近注目されている超高速域とされる回転数や送り値での切削加工などに代表されるパワーエレクトロニクスの技術⁴⁾を仕上げ加工に用いることで、形彫放電加工における、仕上げ加工の大幅な加工時間の短縮を検討したものである。具体的には、本研究では、形彫放電加工機において荒加工後、同機上で超高速回転ミーリングを用い仕上げ加工を行うという複合加工における研究開発を行いその可能性について検討する。(以下この加工法を複合加工と略称)。

また、放電加工後の磨き作業は、現在においても人手による磨きに頼っており、この磨き作業においても、大幅な時間を要することが、古くからきわめて大きな課題である。それに加え、磨きの作業は、作業者の経験や技能に依存することが多く、それぞれの職場の歴史や、工作物の材質によっても異なる。そうしたなかで、磨き作業を受けもつ熟練工の確保が次第に難しくなってきた昨今、広い範囲で利用可能な磨き加工法の研究開発が必要であると考えられる²⁾。

すなわち、形彫放電加工と超高速回転ミーリングの複合加工を行うことにより、形彫放電加工の仕上げ時間の大幅な短縮と共に、放電加工後の磨き作業における、大幅な加工時間短縮が可能であることがいえる。

また、複合加工における加工時間短縮以外にも、以下に示すような利点が挙げられる。

1. 仕上げ工程を切削加工で行うことによって仕上げ加工と同時に金型において致命的とされる表面変質層も除去できるものであり、磨き作業の低減に繋がる。
2. 現在放電加工において加工時間の大部分は仕上げ工程に費やされている。これを複合加工法を用いることによって加工時間の大幅な短縮を図れると共に、仕上げ工程のNC化が出来る。
3. 高硬度材や難切削材を加工するにあたっては、ミーリングのみで加工を施すよりも、荒加工段階を放電加工で加工することによって加工の効率化を図ることが出来る。

4. 荒加工から仕上げ加工までを同一機械上で行うために、ワークのチャッキングに伴う位置決め寸法誤差や、その他の付随する誤差発生原因を除去できるものである。また、同一機上で加工するためにワークを加工液に完全に沈めて加工できることから、加工液を軸付近から噴出する従来のミーリング加工法よりも冷却効果を始め、排出効果などの効率を向上させることが出来る。
5. 従来、放電加工機のみで金型を精密に仕上げる場合には荒加工用電極や仕上げ用電極など数本の電極を用いる必要があった。これを複合加工法を用いることによって仕上げ用電極を不要とできることから、それに費やす時間やコストを削減出来る。

以上の点より、複合加工法を用いることによって様々な利点を見出すことが出来る。そこで、本論文では最終目的を実際の 3 次元形状の複合加工とし、それに関する研究内容を大きく 4 つの項目に分けて論文を進めていく。まず、切り込み深さと残留放電痕の関係についての実験を行い各放電荒加工面に対する最小切り込み値 Z を求める。次に前実験で求めた最小切り込み量での最大ピック量の選定を行い使用限界値となるピック量を選定する。次に加工パターンを変化させて最適とされるパターンを決定し、最後に実験結果に基づいた条件下において 3 次元形状を複合加工法を用いて加工を行う。また、全体を通して種々のデータを採取すると共に、特に表面粗さと加工時間に着目して、従来加工法と比較を行い複合加工法の実現に向けた考察を行うものである。

2.1.1 従来の磨き作業について

みがき作業とは手作業または電動工具を用いて行われる作業で、加工によって発生した変質層の除去や、鏡面となる加工面を得るために行われる仕上げ作業のことである。

この工程には金型製作に費やす時間の中でも多くの比率を占めているため、金型製作の現場では常に問題視されてきた。この作業には多大な労力を必要とする他、非常に熟練を要するかこうでもあり、昨今みがき技術者の確保が難しくなってきたために、自動化を促すことが早急な問題となっている。自動化が難易である理由としては、金型自体が単品で生産されることや、現在使用されている金型には複雑な形状を持つものが多いことなどがあげられる。また、技術面では、多くの経験や技能を必要とされることや、作業方法、使用工具も各現場や職人によって異なることも自動化する点で問題となってくる。さらに、 $2\sim3\mu\text{m/Ry}$ の表面粗さを必要とする場合にはかなりの熟練が要求され、経験の浅い技術者ではエッジ部の加工や平面加工に問題が生じてしまう。

みがき作業は図 1.1 に示す工程をおいて進められ、やすり、きさげなどの作業の他に電動工具を用いて作業を行うことが一般的である。また、表 1.1 に示す各加工法の加工限界より、必要とされる

表面粗さまで処理を行い、金型としてようやく用できるようになるのである。

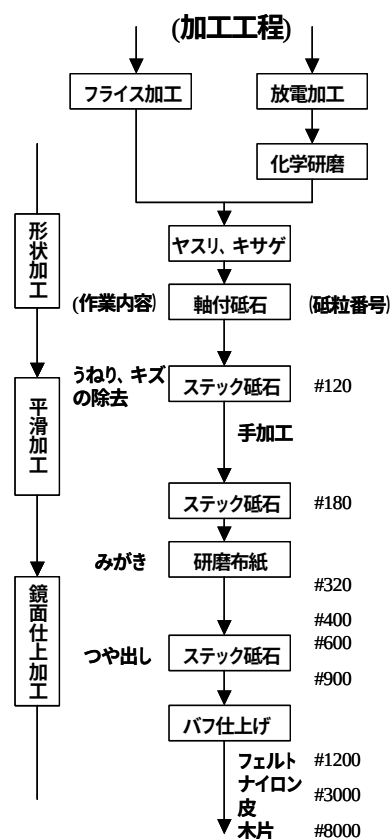


図2-1 仕上げ加工手順例⁵⁾

表 1.1 仕上げ加工法の加工限界⁵⁾

仕上げ加工法	表面粗さ	取りしろ
やすり	5～50	3～8
研磨布紙	0.4～2	5～10
ステック砥石	0.4～6	5～10
ラッピング	0.1～0.8	3～5
電解研磨	3～8	10～15/10min
化学研磨	2～5	20/10min

注) 加工面積を 10cm^2 としたとき

2.2 実験装置及び測定方法

2.2.1 実験装置

(1) 彫放電加工機 三菱電機社製 VX10

本研究は、放電加工と超高速回転ミーリング加工の複合加工を行うことを目的としている。つまり、放電荒加工を行った後に同機械上にてミーリング機能を持ったものに軸交換して加工を行うわけである。そのためにも加工機にはその二つの機能が必要となる。機械は、図 2-1 に示すような、第 1 章で使用した三菱電機社製 VX10 を用いて実験を行った。同機の主要な仕様を表 2-1 に示す。



図 2-1 形彫放電加工機の外観写真

表 2-1 VX10 の主要な仕様

最小指令単位	0.1 μm
最小駆動単位	0.1 μm
駆動方式	AC サーボモータ
位置検出方式	ロータリーエンコーダ

まず放電荒加工についてであるが、使用した加工条件は、形彫放電加工機 VX-10 に内蔵されている加工条件自動探索機能である ESPA を使用して加工条件を導きだした。加工条件自動探索機能については、第 1 章で述べたとおりである。

放電加工機にて荒加工を施した後、機械軸は本実験のために製作した超高速回転ミーリング用の機器に軸交換を行って加工を行った。これについての詳細な説明は次の 2.2 項にて述べるものとする。

(2)スピンドルコントロールユニット NSK 社製 ASTRO-E400

本論文での切削加工は全て図 2-2 に示すスピンドルユニットを用いて加工を行った。このスピンドルユニットは歯科医療器具を応用したものであり、0～40,000rpm の回転制御域を有している。また同機は本来マシニングセンタ用に開発されているために、放電加工機に直に取り付けることは出来な構造になっている。したがって、ユニット上部のチャック用部分であるテーパ部を取り外し、次節に示すスペーサを割り込ませることによって放電加工機に取り付けた。



図 2-2 スピンドルコントロールユニット外観写真

(3) 6 軸力覚センサ ATI 社製 Delta ST-330-30

放電加工機に超高速回転ミーリング加工機能を付随させることによって加工軸に多大な切削力が負荷される事が考えられる。そこで、図 2-3 に示す ATI 社製の 6 軸力覚センサを加工軸と機械の間に取り付けて、機械に負荷する種々の力を測定した。このセンサは、Force 及び Torque を測定することが出来るセンサである。機能については定格で Force の x,y 方向では±330N、z 方向では±990N、Torque に関しては書く方向に±30N-m まで測定できるものであり、分解能は Force の x,y 方向では±1/64N、z 方向では±1/32N、Torque に関しては±3/3200N-m を有するものである。このセンサは上部に 6 つ、下部に 4 つねじ穴を有しており、取り付けの際はこれらのねじ穴を用いて行った。取り付け方法に関しては次節にて説明を行う。



図 2-3 6 軸力覚センサ外観写真

(4)ISA-BUS カード ATI 社製

図 2-4 に示した Force 及び Torque は図 2.4 に示す ISA-BUS カードを介してパソコンにデータを転送する。このカードは 6 軸力覚センサにて得られたデータをパソコンにリアルタイムに表示させるためのものである。表 2-2 にその機能を示す。

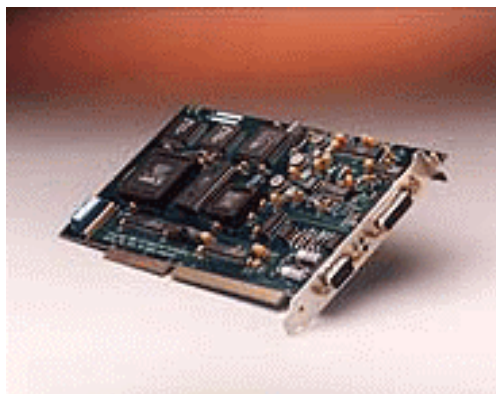


図 2-4 ISA-BUS カード外観写真

表 2-2 ISA-BUS カードの主要な仕様

I/O アドレス	4 ポート占有
バス仕様	AT バス仕様
サンプリング	7.8kHz
分解能	12～16bit

(5) ATI ISA F/T Demo ソフト Ver2.6.0 ATI 社製

6 軸力覚センサと ISA-BUS カードにて得られたデータは、図 2-5 に示すソフトウェアによって単位換算され、N と N-m としてリアルタイムに表示される。このソフトウェアは数値で値を表示すると同時に、仮想空間上に力を表示することが出来る。また、採取したデータを記録する機能も備えており、Excel のマクロを用いて表示する機能も兼ね備えている。データは 10Hz から 7800Hz までの周期で採取することが可能である。

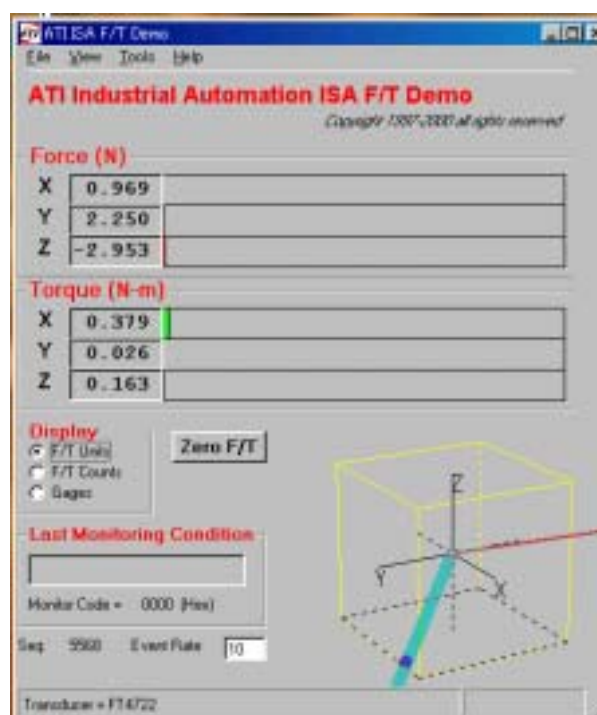


図 2-5 ATI ISA F/T Demo ソフト

(6) 東京精密製 小型表面粗さ測定器 ハンディサーフ E-35A

今回用いた面粗さ測定器は図 2-6 に示す東京精密製のものである。これは、ハンディタイプであるために、計測箇所まで同機を持ち運び測定することが出来る。また、同機は測定データをパソコンに取り込む機能を有しており、Excel のマクロを通じてデータを表示、解析することが出来るようになっている。本実験での測定は図 2-7 に示すように、超高速回転ミーリング加工後のカッター筋に対して垂直方向と水平方向の 2 方向について行い、10 回の測定値の平均値より表面粗さ求めた。ここで、カットオフ波長 0.8mm で行い、測定長さはカットオフ値の 5 倍である 4mm として測定を行った。同機の主要な機能については表 2-3 に示す。



図 2-6 面粗さ測定器

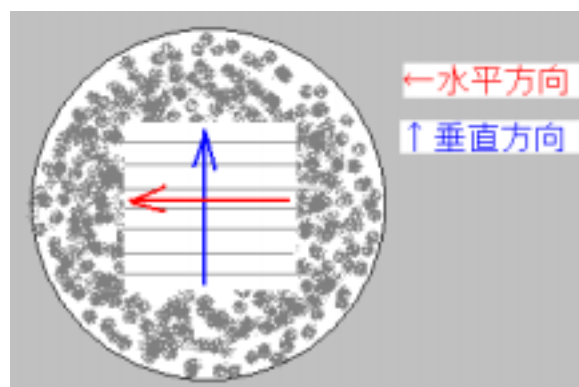


図 2-7 測定方法

表 2-3 表面粗さ測定器の主要な使用

測定範囲	X 軸:12.5mm Z 軸:±160 μ m
変換器	差動インダクタンス方式
触針先端	ダイヤモンド 90°円錐 5 μ mR
測定力	4mN(0.4gf)以下
パラメータ	(JIS)Ra,Rq,Ry,Rz,Rt,Sm,Pc,tp,Rpk

(7) 測定顕微鏡 MITUTOYO TF-510F

超高速回転ミーリングを施したワークに対して、図 2-8 に示す測定顕微鏡にて観察、及び測定を行った。この顕微鏡は 30～500 倍まで測定できる他に、測定機能を持っており、クロスゲージを利用して X 軸、Y 軸共に最小 1 μ m までの計測を行うことが可能である。また、機械上部にマイクロ・ネット社の NYpixW マルチシステムを介在させることにより、NIKON coolpix950 を装着してデジタルカメラで画像を記録することが可能である。本実験では加工表面観察には 100 倍の倍率を用い、加工断面写真計測は 500 倍の倍率を用いた。同機的主要仕様を表 2-4 に示す。



図 2-8 測定顕微鏡の外観写真

表 2-4 測定顕微鏡の主要な使用

形式	支柱直立型
接眼鏡筒	30 °
対物レンズ倍率	×3、×10、×50
接眼レンズ倍率	×10
透過照明装置	反射照明装置
測定最小寸法	1 μ m
接続用アタッチメント	マイクロ・ネット社製 NypixW マルチシステム 00201
記録用デジタルカメラ	NIKON COOLPIX 950

2.2.2 実験装置接続図

超高速回転ミーリング加工用に製作した軸は図 2-9 中の①～⑧の部品で構成されている。この各部品の詳細は表 2-5 に示す通りで、⑦のモーター・スピンドルユニットに⑧のボールエンドミルをチャックさせて加工するものである。また、④の 6 軸力覚センサを加工軸内に収め、軸に付加する力を測定できるようにした。機械に対しては①のエアーチャックアダプターと②のマクロパレットを通じて図 2-10 中の⑨の自動チャックマクロに接続する形式をとっている。このチャック法を用いることによって、他の加工、例えば放電加工を行うときは⑨に放電加工用の電極をチャックすると加工出来るようになる。つまり、放電加工機とのチャック用部分と 6 軸力覚センサ、モーター・スピンドルを③、⑤、⑥の各スペーサを用いて一つにまとめたものである。この加工軸をネジ等で組み立てたものが図 2-10 である。

⑦のモーター・スピンドルは、有線にてコントロールユニットに接続されており、このユニットから回転数の制御、及びエアーの供給を行うものである。このユニットはシーケンス制御にて機械との組み合わせも出来るが、今回接続は行わなかった。

図 2-9 中のパソコンは 6 軸力覚センサから得られたデータを、単位換算して画面に数値と擬似模型で表示すると共に、得られたデータを記録する役割を持っている。また、同機はインターネットを介して作成した NC データを放電加工機に送る機能も備えている。また、その逆に放電加工内に記録されている NC データを取り込むことも出来るようなシステムになっている。

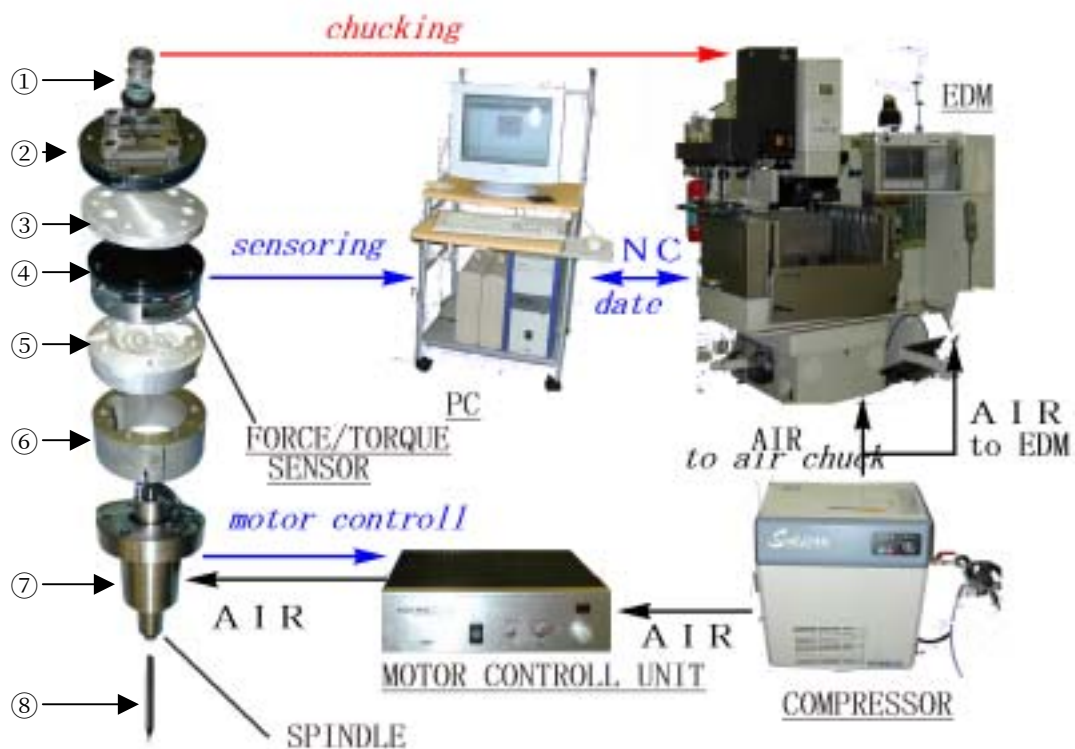


図 2-9 実験装置概要図

表 2-5 図 2-9、図 2-10 内の部品表

図中の番号	製造社名	品番または材質	種類
①	System3R	3R-605.1	エアーチャックアダプター
②	System3R	3R-601.116-PA	マクロパレット
③	自作	ジュラルミン	スペーサ 1
④	ATI	Delta ST-330-30	6 軸 Force/Torque センサ
⑤	自作	ジュラルミン	スペーサ 2
⑥	自作	アルミ	スペーサ 3
⑦	NSK	ASTORO-E400	モーター・スピンドル
⑧	コベルコツール	VC-2MB	ボールエンドミル
⑨	System3R	3R-607.1	自動チャックマキシ/マクロ



図 2-10 軸周り組み立て図

2.2.3 6 軸センサ概要

図 2-9 で示したとおり Force/Torque センサを加工機軸のスピンドルにスペーサー上下を用いて取り付けた。センサからのデータは、ISA-BUS カードを用いパソコンでリアルタイムに表示・保存することが可能である。次に、図 2-11 にセンサにおける Force/Torque の向きを示した。本論文では Force を F と略称し、Torque を T と略称する。また、各々の方向に対する成分を x, y, z と規定して、 F_x 、 T_x のように呼ぶこととする。図の手前側が加工機の手前にあたり、それぞれの軸に対して図のように方向を定義するものとする。



図 2-11 Force/Torque センサ定義

図 2-12 と図 2-13 は加工ワークと非接触状態でのスピンドル 40000rpm 時の Force と Torque のデータをそれぞれ示したものであり、非加工時での回転による負荷を示したものである。測定は、5 分間行いサンプルレートは 100Hz で測定した。グラフをみてわかるように、まず非加工時においてのスピンドルの回転による負荷は Force/Torque ともにごくわずかで、Force においては $\pm 0.1[\text{N}]$ 以内であり、Torque はプラス方向は、 $0.0025[\text{N}\cdot\text{M}]$ 以内であることから、マイナス方向においては $0.005[\text{N}\cdot\text{M}]$ 以内ということがわかる。以上のように、これらの値は、ごく小さい値であり、実際の加工及び測定時には、無視できる値であるといえる。

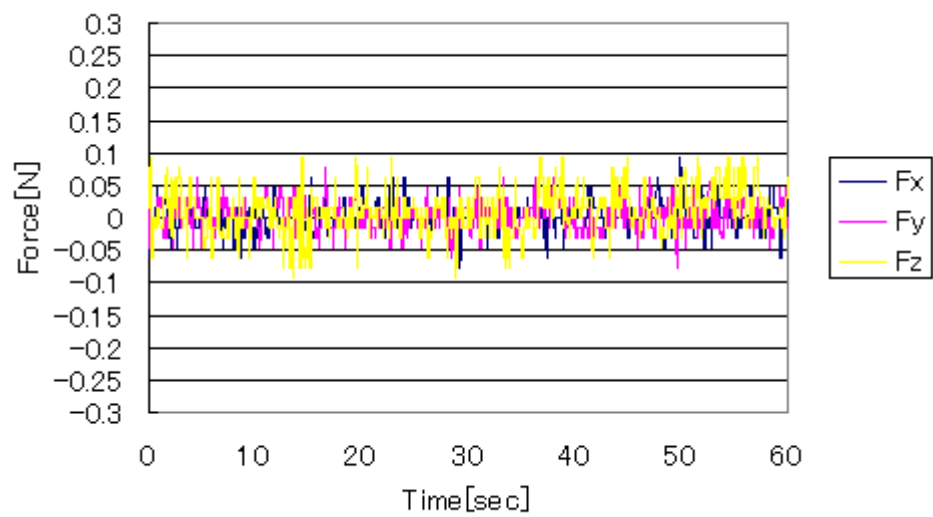


図 2-12 非加工時 40000rpm の Force

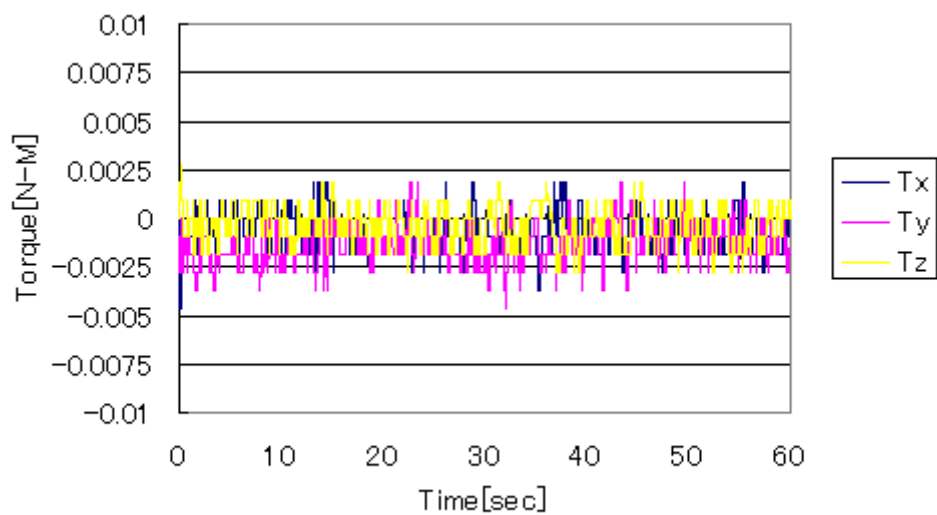


図 2-13 非加工時 40000rpm の Torque

次に、一辺 10mm の正方形を時計回りと反時計回りに一回り超高速回転ミーリングを行い切削方向における Force/Torque の正負の関係を調べた。それぞれの Force/Torque のテスト加工の測定結果を図 2-14～図 2-17 に示す。

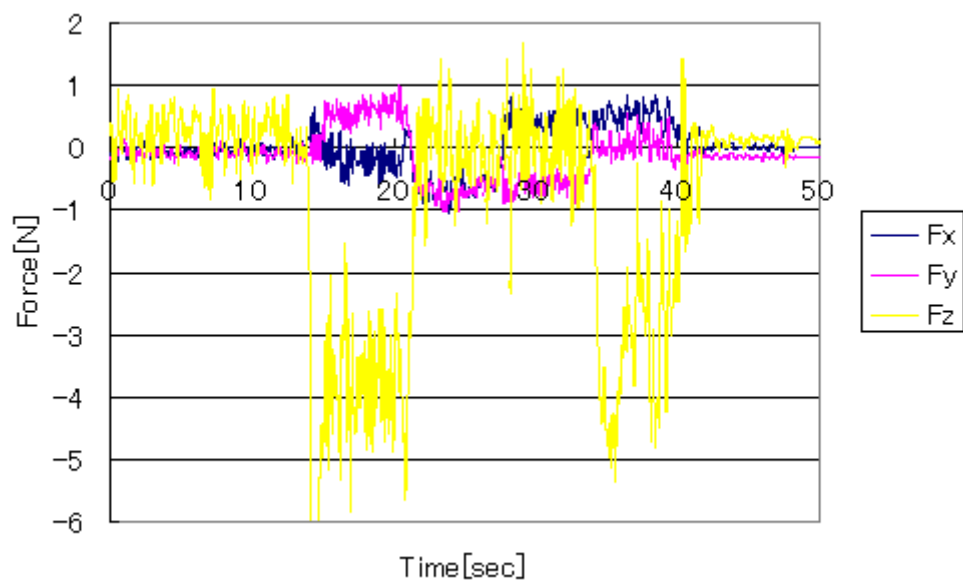


図 2-14 正方形における時計回りの高速切削の Force

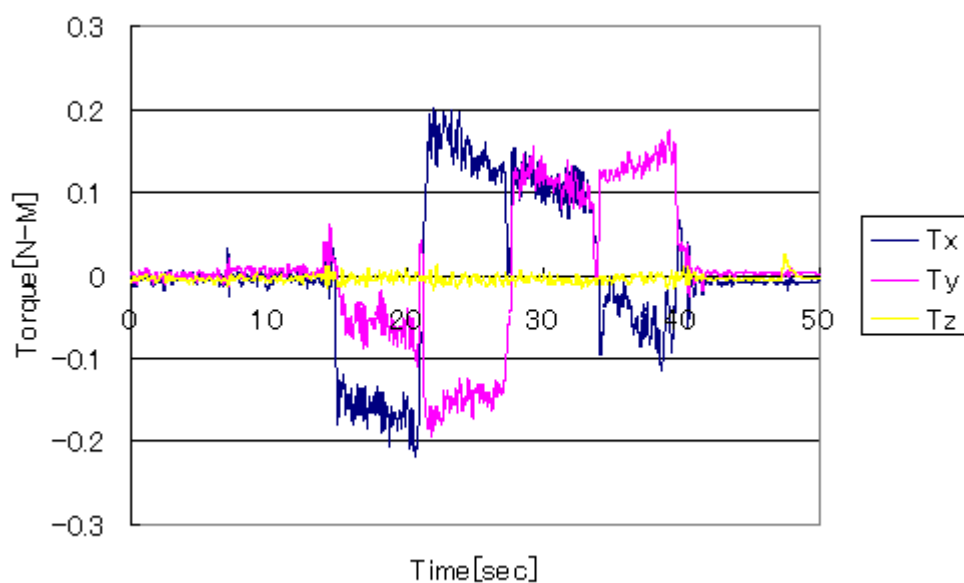


図 2-15 正方形における時計回りの超高速回転ミーリングの Torque

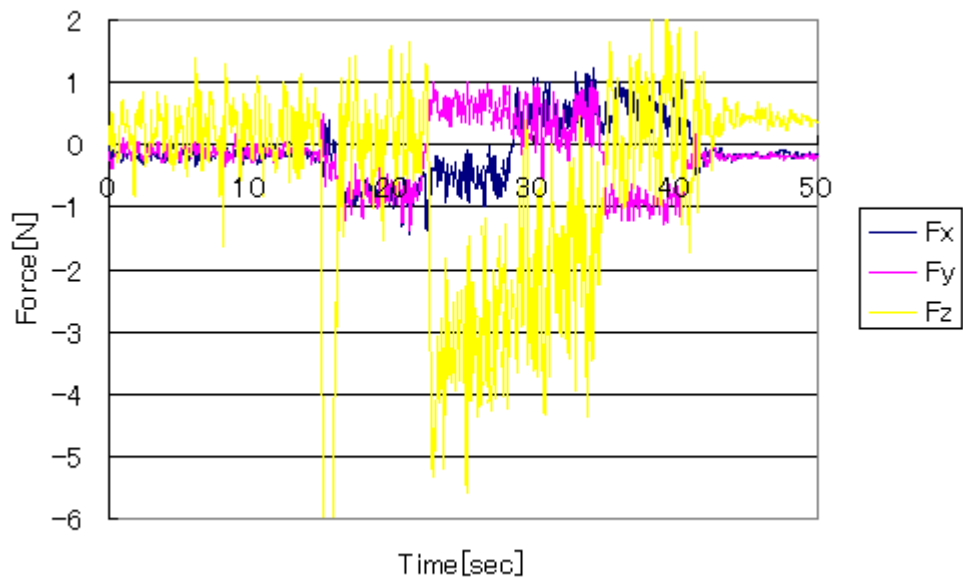


図 2-16 正方形における反時計回りの超高速回転ミーリングの Force

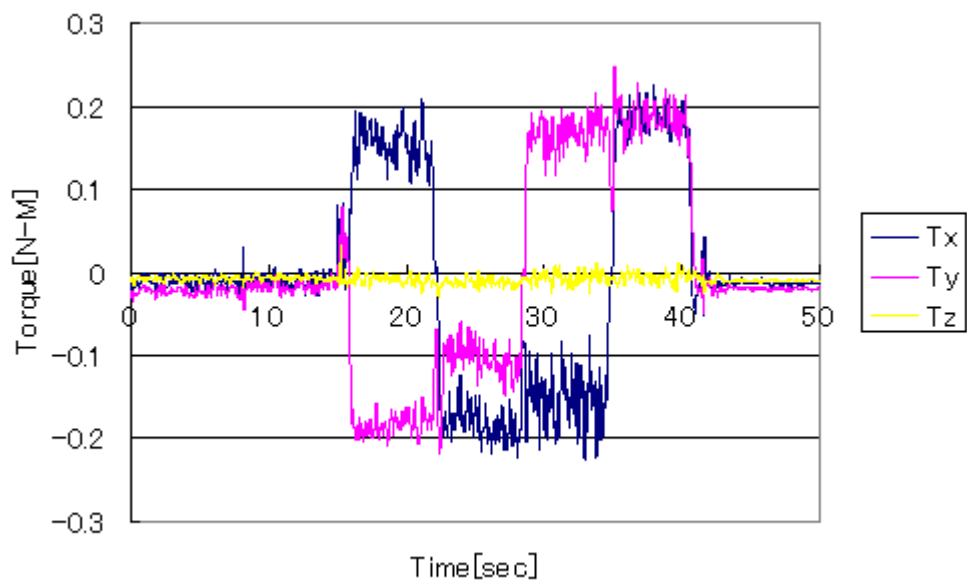


図 2-17 正方形における反時計回りの超高速回転ミーリングの Torque

以上のグラフ 2-14～図 2-17 の方向性を表 2-6 と表 2-7 に表す。

表 2-6 時計回り加工の Force/Torque の加工方向

加工 方向	F_x	F_y	F_z	T_x	T_y	T_z
↑	－	＋	－	－	－	0
→	－	－	0	＋	－	0
↓	＋	－	0	＋	＋	0
←	＋	＋	－	－	＋	0

表 2-7 反時計回り加工の Force/Torque の加工方向

加工 方向	F_x	F_y	F_z	T_x	T_y	T_z
→	－	－	0	＋	－	0
↑	－	＋	－	－	－	0
←	＋	＋	－	－	＋	0
↓	＋	－	0	＋	＋	0

表 2-6 と表 2-7 より双方の実験結果においての加工方向と Force 及び Torque の正負の向きが一致していることがわかり、このことにより加工方向による Force 及び Torque の力の向きを判別することが出来る。

2.3 切り込み深さと残留放電痕の関係について

2.3.1 実験概要

本実験では、荒加工放電面において超高速回転ミーリング加工を行い、切り込み深さと残留放電痕の関係について実験を行う。放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ と $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ のワーク材料において任意に切り込み量 Z 値を設定し、それぞれの表面粗さ、軸にかかる Force/Torque を測定し、完全に放電痕が取り除ける最小の切り込み量 (Z) の値を求める。また、残留放電痕と切り込み値との関係を調べると共に、放電加工による加工表面の変質層との関係も調べ、切り込み量の変化における白層除去量を検討する。

2.3.2 実験方法

形彫放電加工機を用いワーク材料 SK-5 において荒加工を行い、放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ と $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ のワーク材料を製作し、表 2-8 で示すように Z の値を設定して縦 10mm ×横 10mm の正方形を図 2-18 で示すように走査線状に超高速回転ミーリングを行った。本実験においては、表 2-9 に示す加工条件を一定とした中で、表 2-8 に示す実験条件を変化させて実験を行った。

表 2-8 実験条件

試験材料	放電面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$	放電面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$
切り込み 量 Z μm	15	25
	20	35
	25	40
	35	45

表 2-9 加工条件

被加工物	SK5
電極材料	CU
送り[mm/min]	100
主軸回転数[rpm]	40000
ピック量 $Y[\mu\text{m}]$	10
ボールエンドミル直径[mm]	0.8
加工液液面高さ[mm]	20

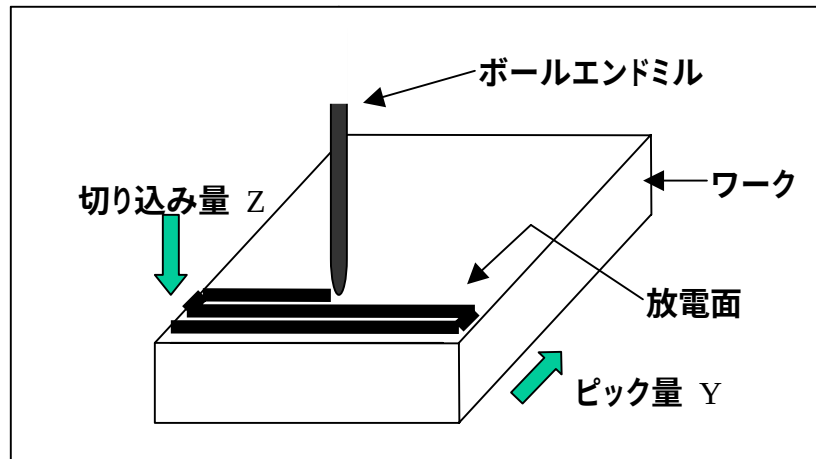


図 2-18 超高速回転ミーリング加工パターン図

2.3.3 実験結果

(1) 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ に対して加工を施した実験結果

・顕微鏡写真による実験結果

放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ における超高速回転ミーリング後の顕微鏡写真を以下に示す。まず未切削の放電面の顕微鏡写真を図 2-19 に示し、各切り込み量(Z)での顕微鏡写真を図 2-20～図 2-23 に示す。図 2-20 をみて分かるように、放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ の表面において超高速回転ミーリングを切り込み量(Z) $15\ \mu\text{m}$ で加工した場合、放電痕はかなりの割合で取り残されており、約 40% 余り残されているといえる。つぎに、図 2-21 における切り込み量(Z) $20\ \mu\text{m}$ においては、約 10% 程度の放電痕が取り残されているといえる。図 2-22 の切り込み量(Z) $25\ \mu\text{m}$ においては、ほぼ放電痕は取り除かれているといえ、残留放電痕は、約 5% 以下とみられ十分使用可能であるといえる。さらに、図 2-23 の切り込み量(Z) $30\ \mu\text{m}$ の実験結果においては、ほぼ完全に放電痕が取り除かれていることが分かる。すなわち、顕微鏡写真で判断する放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ における超高速回転ミーリングにおいては、切り込み量(Z)は、 $25\ \mu\text{m} \sim 35\ \mu\text{m}$ が切り込み量が最小で実用的だということがわかった。

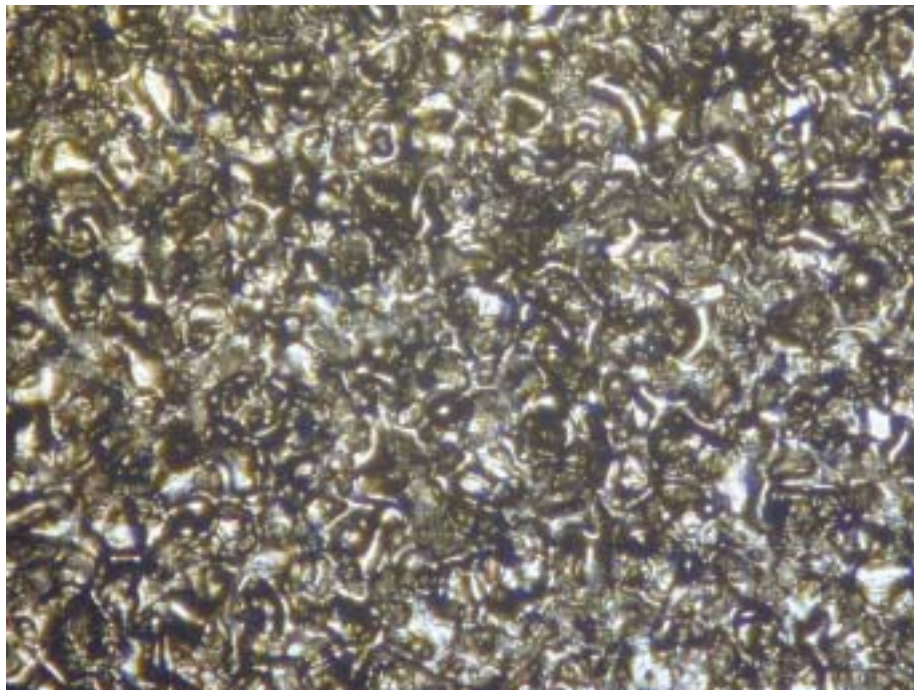


図 2-19 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ の場合の顕微鏡写真($\times 100$)

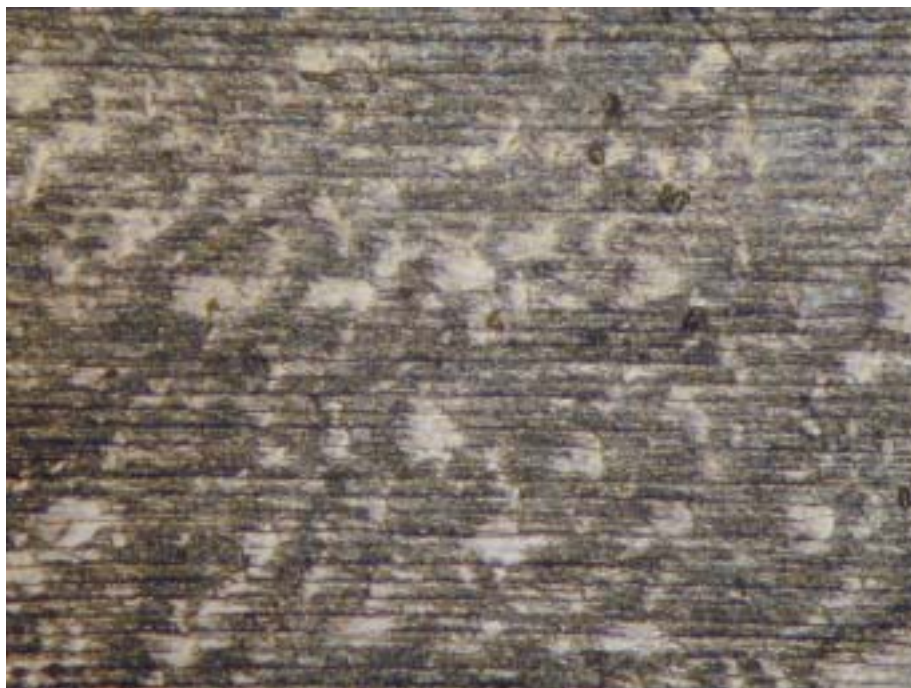


図 2-20 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングで切り込み量 $15\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)



図 2-21 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングで切り込み量 $20\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

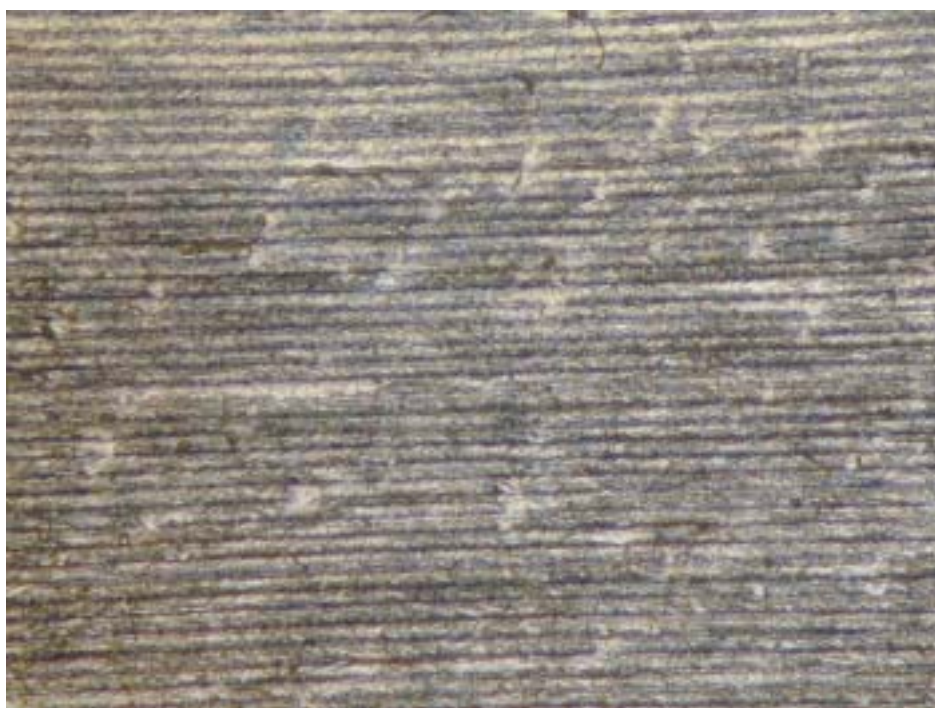


図 2-22 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ を超高速回転ミーリングで切り込み量 $25\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

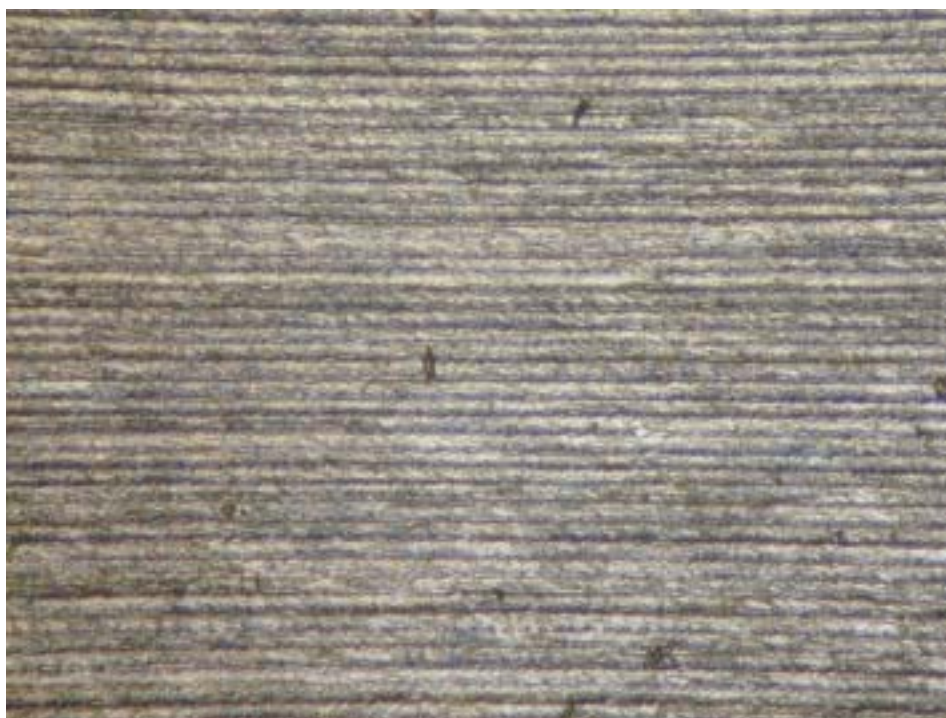


図 2-23 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}$ を超高速回転ミーリングで切り込み量 $35\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

・表面粗さの実験結果

次に、図 2-24 に表面粗さを示したが、本実験では、超高速回転ミーリングのエンドミルの加工方向、すなわち加工カッター筋に対して平行方向に測定した結果と、加工方向に対して垂直方向に測定した結果と二種類の表面粗さを図示した。表面粗さは、当然、垂直方向より平行方向のほうが表面粗さは良い結果となり、測定項目においての 4 種類の垂直方向と平行方向の表面粗さの R_y 値の差の平均は、 $1.04 \mu\text{m}$ と垂直方向の加工カッター筋は、およそ $1 \mu\text{m}$ 程度ということが推測できる。

値は多少前後しているものの、その最大値と最小値の R_y 値の差は垂直方向では $0.34 \mu\text{m}$ 、平行方向では $0.49 \mu\text{m}$ であることから、表面粗さは切り込み量 (Z) $15 \mu\text{m}$ 以上ではほぼ一定であるといえる。しかしながら、表面粗さは一定であるのに対して加工表面写真に違いがあることが確認できるが、これは切り残り放電痕が極々微細であるために表面粗さに影響をほとんど及ぼさないものであることが考えられる。また、切り込み量 (Z) が $15 \mu\text{m}$ 以下の条件下で加工したときは、当然切り残り放電痕が増加することが予想でき、表面粗さは悪くなるものと予想できる。

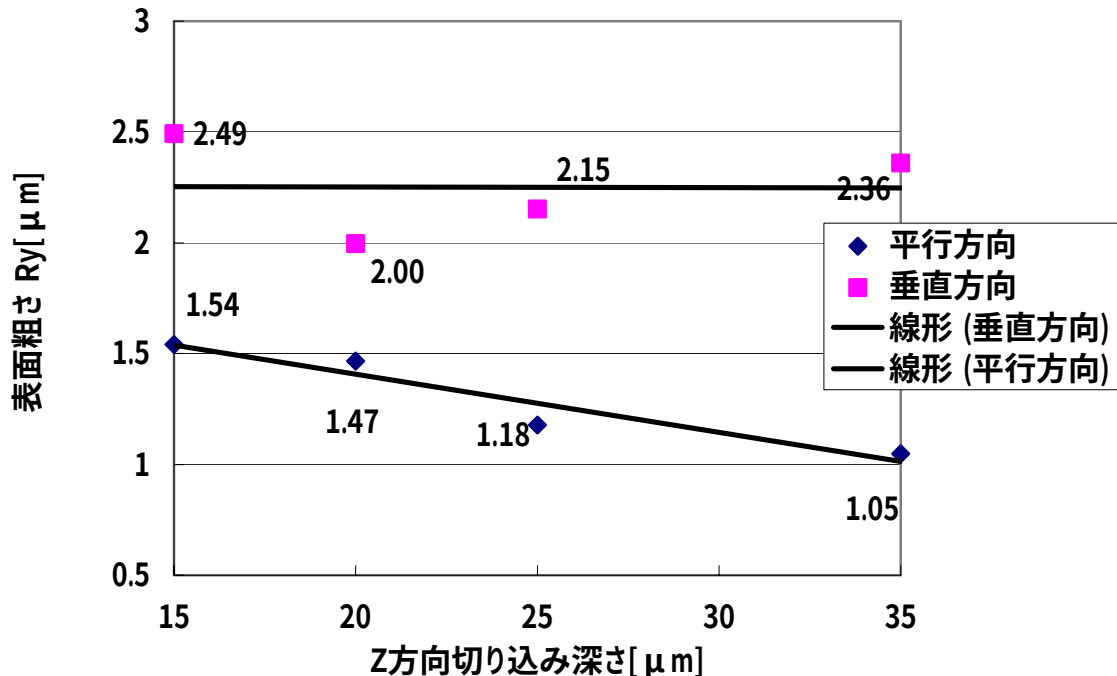


図 2-24 放電荒加工面 $15 \mu\text{m}/R_y$ での表面粗さ実験結果

・センサによる Force/Torque の測定結果

次に、Force/Torque のグラフを図 2-25～図 2-48 に示した。Force/Torque の測定は、非接触で 40000rpm 状態で測定を開始し、約 5 秒後に加工を開始した。

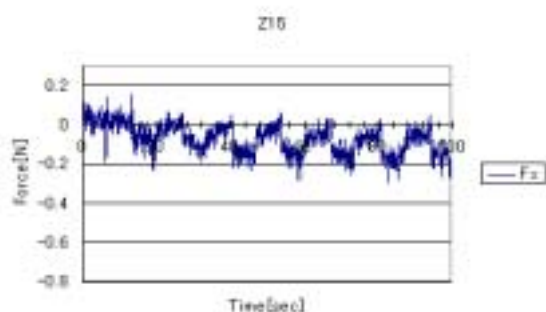


図 2-25 切り込み量 Z15 μm におけるの F_x

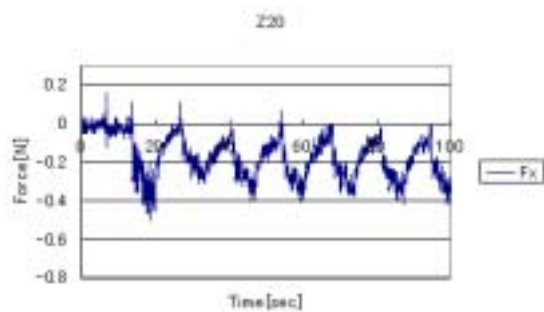


図 2-26 切り込み量 Z20 μm におけるの F_x

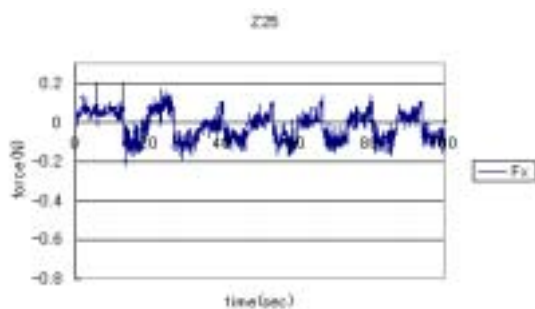


図 2-27 切り込み量 Z25 μm におけるの F_x

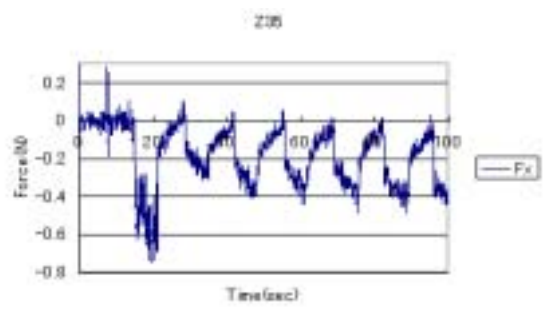


図 2-28 切り込み量 Z35 μm におけるの F_x

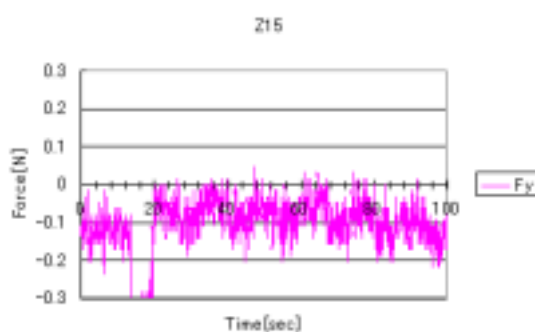


図 2-29 切り込み量 Z15 μm におけるの F_y

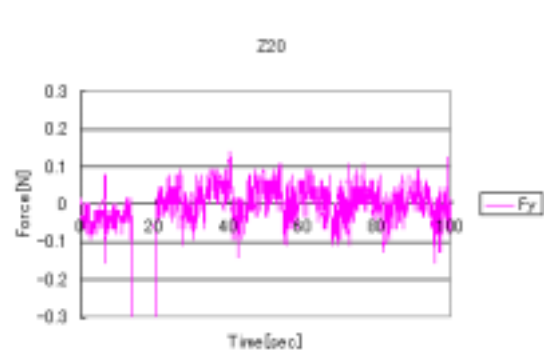


図 2-30 切り込み量 Z25 μm におけるの F_y

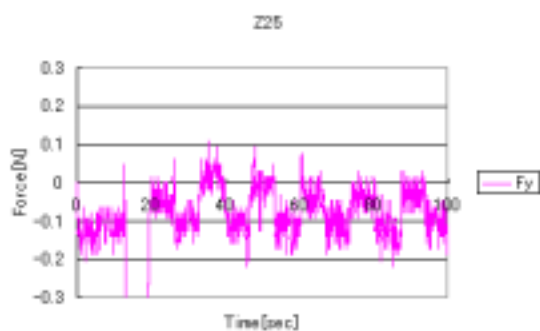


図 2-31 切り込み量 Z25 μm におけるの F_y

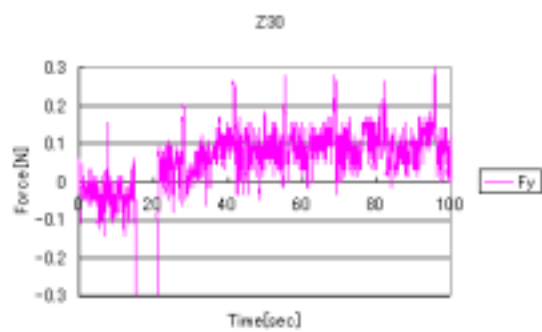


図 2-32 切り込み量 Z30 μm におけるの F_y

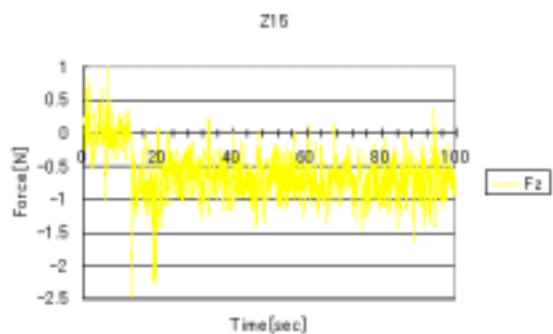


図 2-33 切り込み量 Z15 μm におけるの F_z

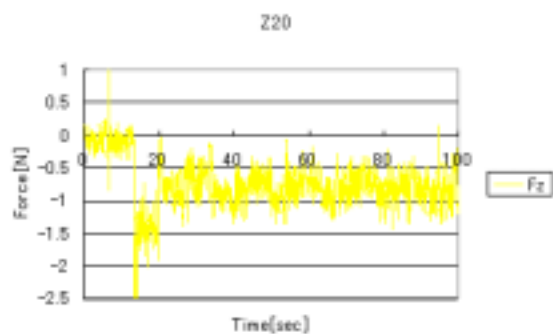


図 2-34 切り込み量 Z20 μm におけるの F_z

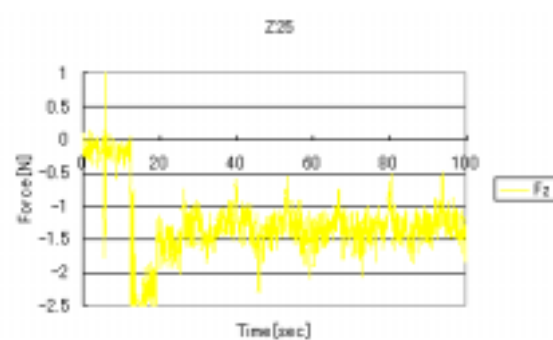


図 2-35 切り込み量 Z25 μm におけるの F_z

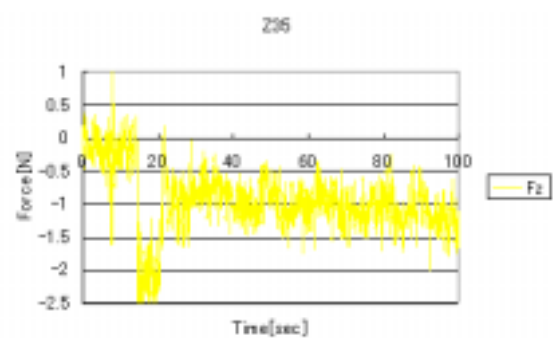


図 2-36 切り込み量 Z35 μm におけるの F_z

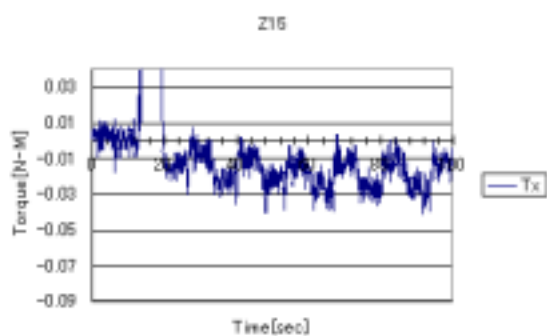


図 2-37 切り込み量 Z15 μm におけるの Tx

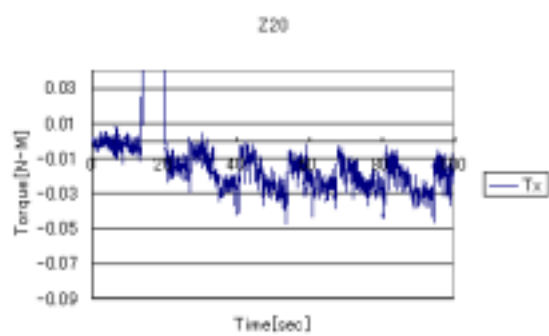


図 2-38 切り込み量 Z20 μm におけるの Tx

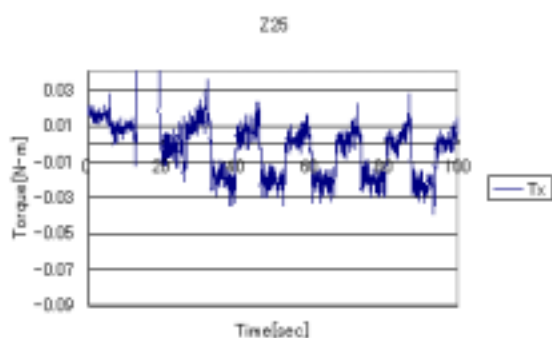


図 2-39 切り込み量 Z25 μm におけるの Tx

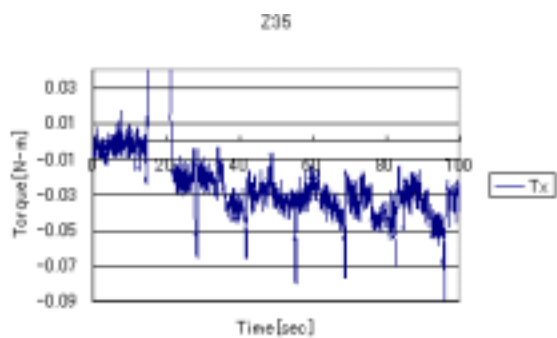


図 2-40 切り込み量 Z35 μm におけるの Tx

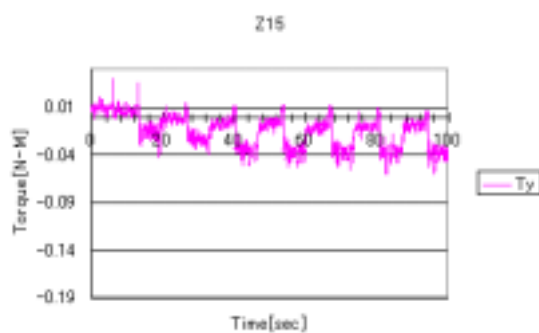


図 2-41 切り込み量 Z15 μm におけるの Ty

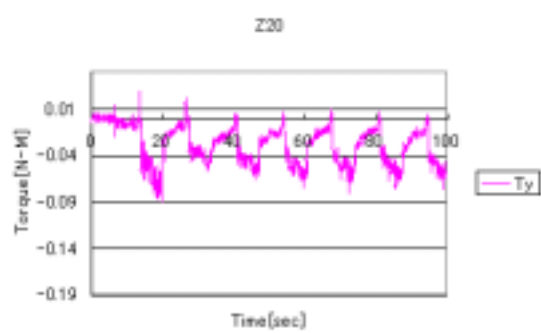


図 2-42 切り込み量 Z20 μm におけるの Ty

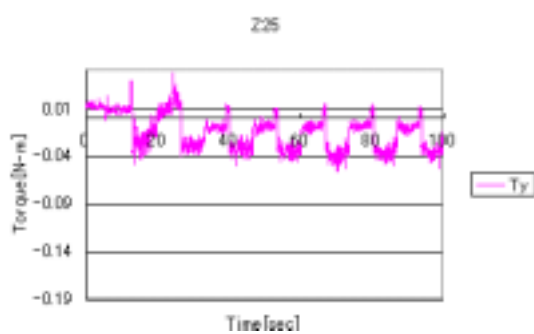


図 2-43 切り込み量 Z25 μm におけるの Ty

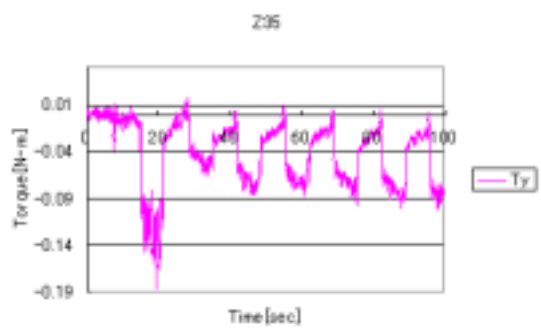


図 2-44 切り込み量 Z35 μm におけるの Ty

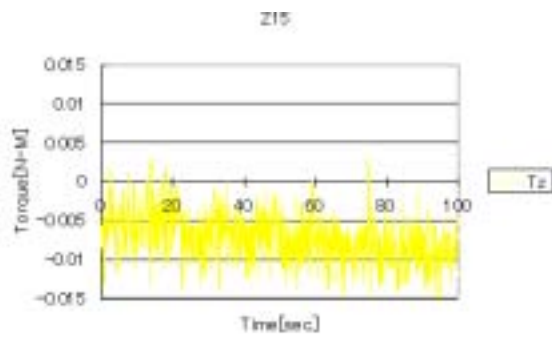


図 2-45 切り込み量 Z15 μm におけるの T_z

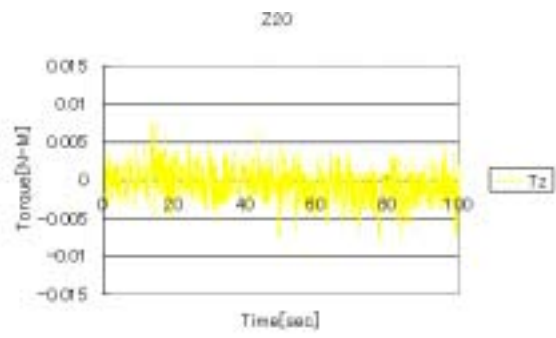


図 2-46 切り込み量 Z20 μm におけるの T_z

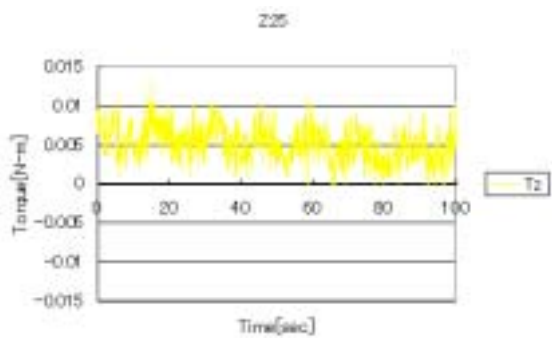


図 2-47 切り込み量 Z25 μm におけるの T_z

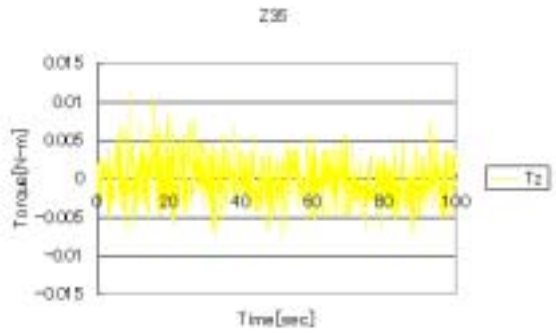


図 2-48 切り込み量 Z35 μm におけるの T_z

・放電荒加工面 $15\mu\text{m/Ry}$ におけるの考察

図 2-49 に Force/Torque のグラフの評価概要を例で示した。図中における A は、非接触での 40000rpm の状態をあらわしており、B については、ボールエンドミルが加工ワークに切り込み X プラス方向に加工した状態である（以下 B の加工を First Approach と略称）。以後、この X 方向のプラス方向、マイナス方向の往復加工の繰り返しであり、その形状の繰り返しのグラフとなっていることがわかる。また、ここで図に示す段階①は各加工において必ずしも X+方向の加工であるというわけではなく、Fx や Tx などの要素によって異ってくる。測定要素と加工方向の関係を表 2-10 に示す。表より Tx 以外は X プラス方向加工がグラフの下側にすることがわかる。図中 B においては、他の X プラス方向の加工よりもかなり大きな値となっているが、これは、加工の一番初めの段階での X プラス方向の加工である。すなわち、この後の繰り返し加工からピック量 Y 値を設定値に合わせてピックするわけだが、初期の切り込みからの X プラス方向の加工においては、当然、ピック後の切削量よりも切削量は増加する。

Force/Torque の実験結果の評価法として、図 2-49 よりまず初期段階 B における加工初期時における値、次に初期段階 B 以後における X プラス方向とマイナス方向における値の 2 つを各実験における設定値ごとに求め評価・解析を行う。

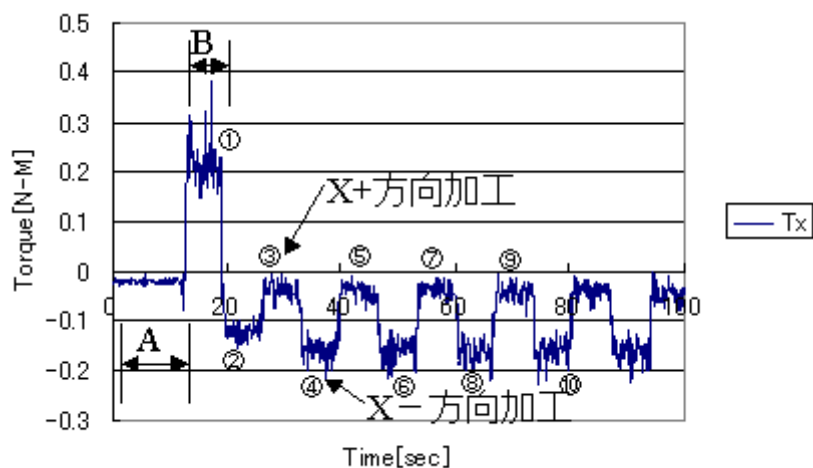


図 2-49 Force/Torque グラフの評価概要

表 2-10 における番号と加工方向の関係

図 3.33 に示す番号	F _x	F _y	F _z	T _x	T _y	T _z
奇数	+	+	+	-	+	+
偶数	-	-	-	+	-	-

図 2-50 と図 2-51 にそれぞれ本実験における放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ における First Approach の Force/Torque をあらわし、次に、図 2-52～図 2-55 に初期段階以後の X プラス方向、及び X マイナス方向の Force/Torque を示した。また、本実験においては、切り込み量 Z 値が数十ミクロンと非常に小さい設定のため、図 2-52～図 2-55 にはより広い範囲で比較が可能なように切り込み量 Z 値を $100\text{ }\mu\text{m}$ 、 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、 $300\text{ }\mu\text{m}$ と測定し測定結果をグラフに追加して示した。図 2-50 における First Approach の Force については、切り込み量 (Z) 値の増加とともに、軸のそれぞれの Force_X、Y、Z 共に増加傾向であるといえる。図 2-51 の First Approach の Torque については、T_z に関しては他の軸でみられたような First Approach 特有の増加がみられなく、X については、増加傾向にあり逆に T_y については減少傾向にある。また、T_x 及び T_y の増減の関係はグラフからもわかるように対象的であるといえる。次に、図 2-52～図 2-53 の加工方向別の Force のグラフについて、プラス方向、マイナス方向の加工それぞれをみても、切り込み量 (Z) に対する Force の差は、最大でも 1[N]前後であり、First Approach における最大差 9[N]から比較してもその差は微小であり、ほぼ一定といえる。また、図 2-54～図 2-55 の加工方向別の Torque においても同様といえ切り込み量 Z の増加に伴う Torque の差は、0.1[N・m]以下であり、こちらも First Approach の 0.8[N]と比較しても、その差は一定といえる。

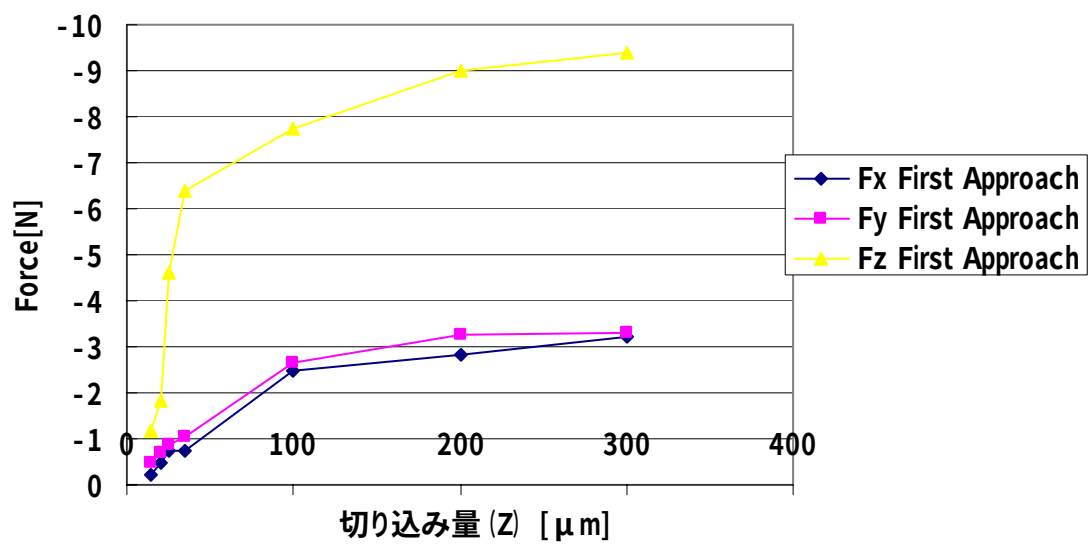


図 2-50 First Approach における Force

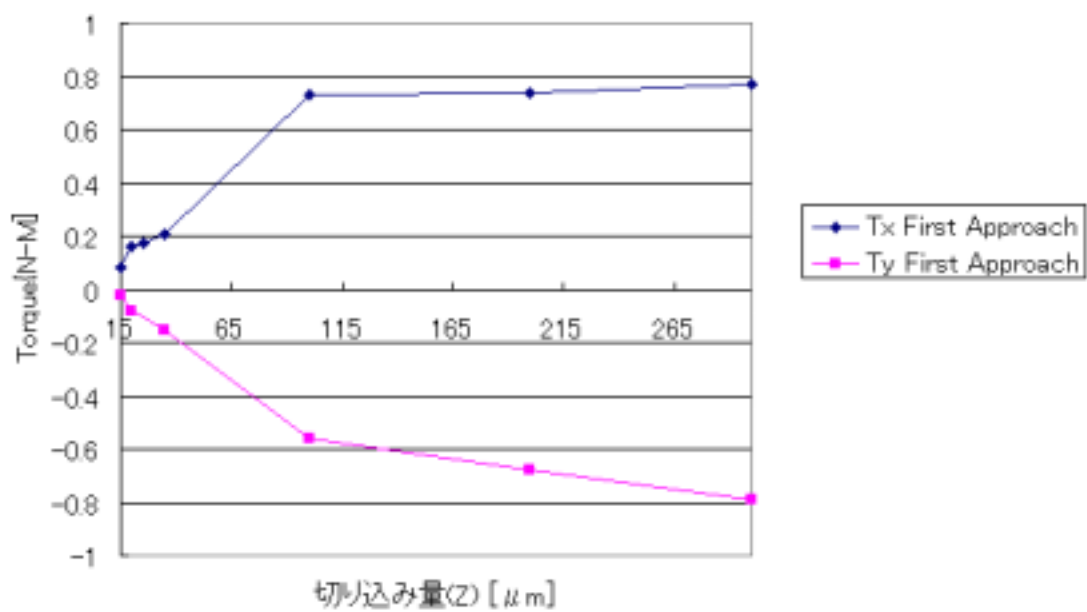


図 2-51 First Approach における Torque

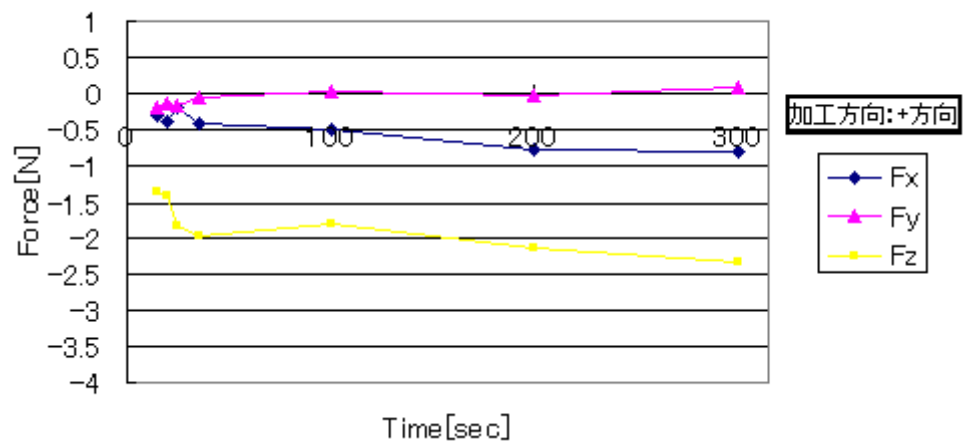


図 2-52 加工方向プラス方向における Force

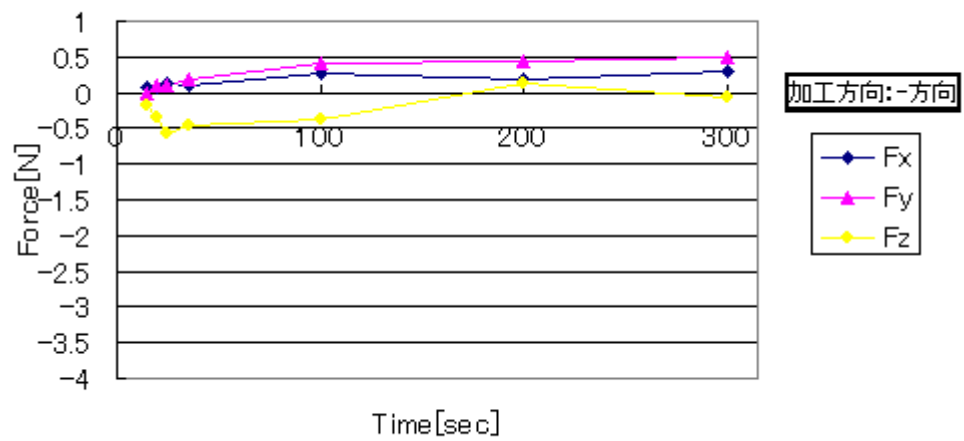


図 2-53 加工方向マイナス方向における Force

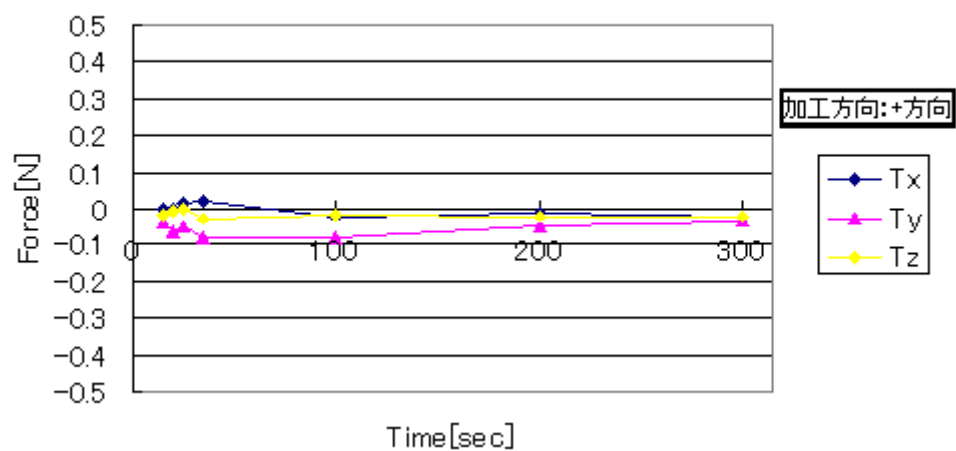


図 2-54 加工方向プラス方向における Torque

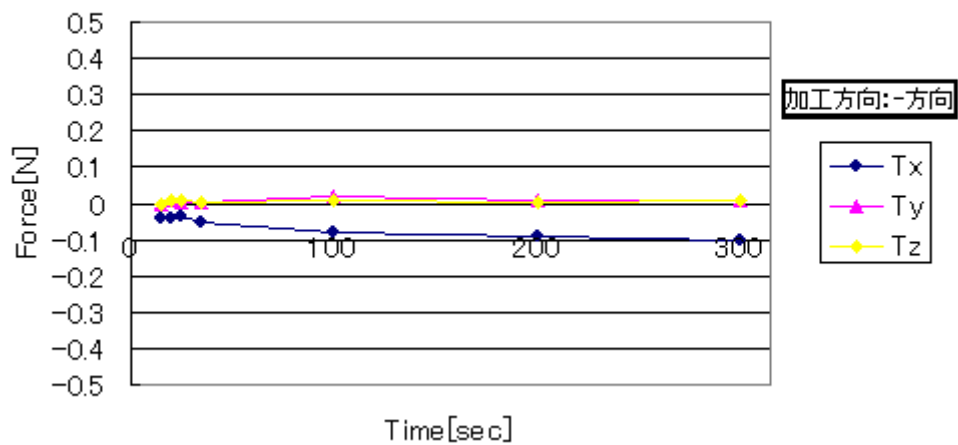


図 2-55 加工方向マイナス方向における Torque

(2) 放電荒加工面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ に対して加工した実験結果

・ 顕微鏡写真による実験結果

放電荒加工面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ における超高速回転ミーリング後の顕微鏡写真を以下に示す。まず未切削の放電荒加工面の顕微鏡写真を図 2-56 に示し、各切り込み量での顕微鏡写真を図 2-57～図 2-60 に示す。顕微鏡写真図 2-57～図 2-60 より放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ 加工時と同様に切り込み量 (Z) が深くなるにつれて切り残し放電痕が減少していることがわかる。切り込み量 (Z) $25\text{ }\mu\text{m}$ で多く見られる放電痕が切り込み量 (Z) $35\text{ }\mu\text{m}$ においてもまだ微かに点在しているのが、一方切り込み量 (Z) $40\text{ }\mu\text{m}$ と (Z) $45\text{ }\mu\text{m}$ を見る限り切り残し放電痕は確認できない。ここから残留放電痕を残さないための最小切り込み値 (Z) は最低 $40\text{ }\mu\text{m}$ 必要となり、実際切削する際にはこれよりも大きい値を用いる必要があることが計り得る。

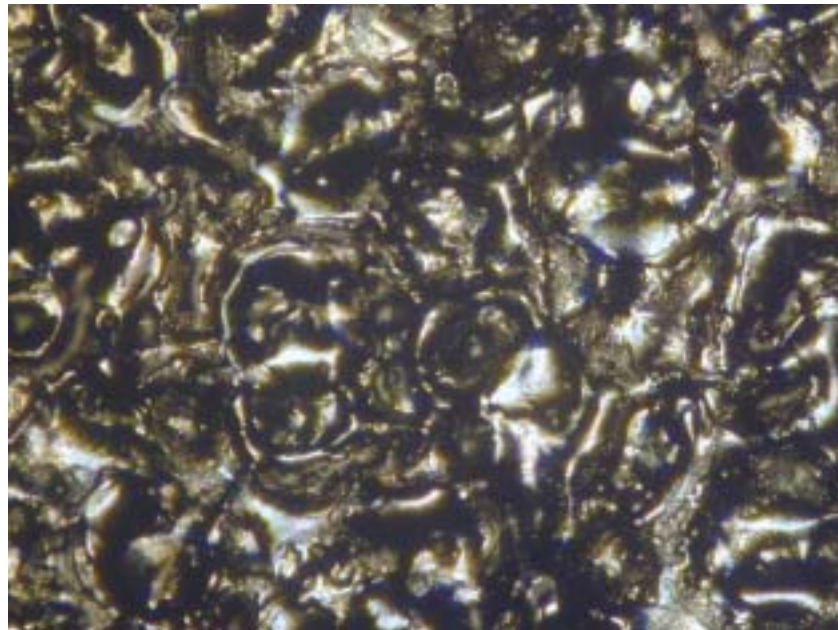


図 2-56 放電面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ の顕微鏡写真 ($\times 100$)

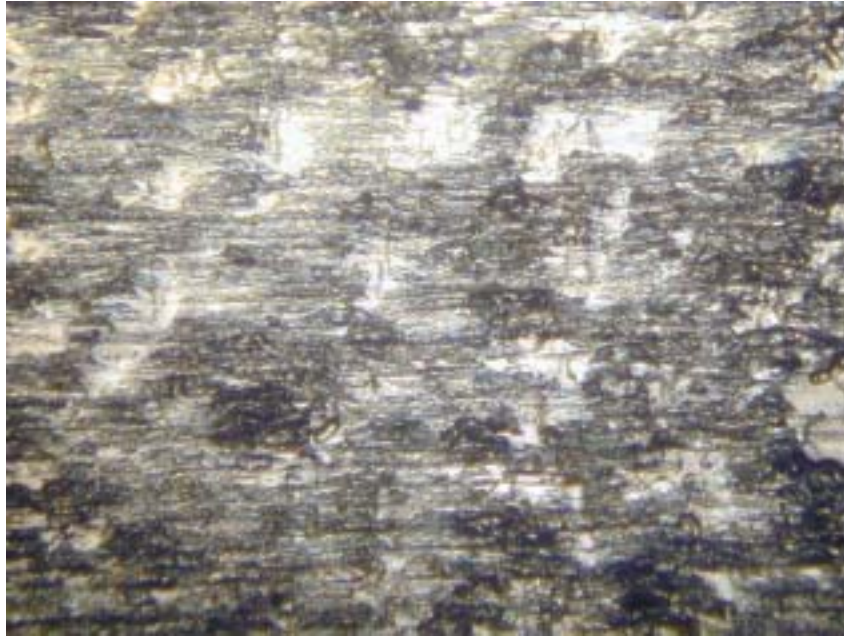


図 2-57 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングで切り込み量 $25\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真($\times 100$)



図 2-58 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングで切り込み量 $35\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

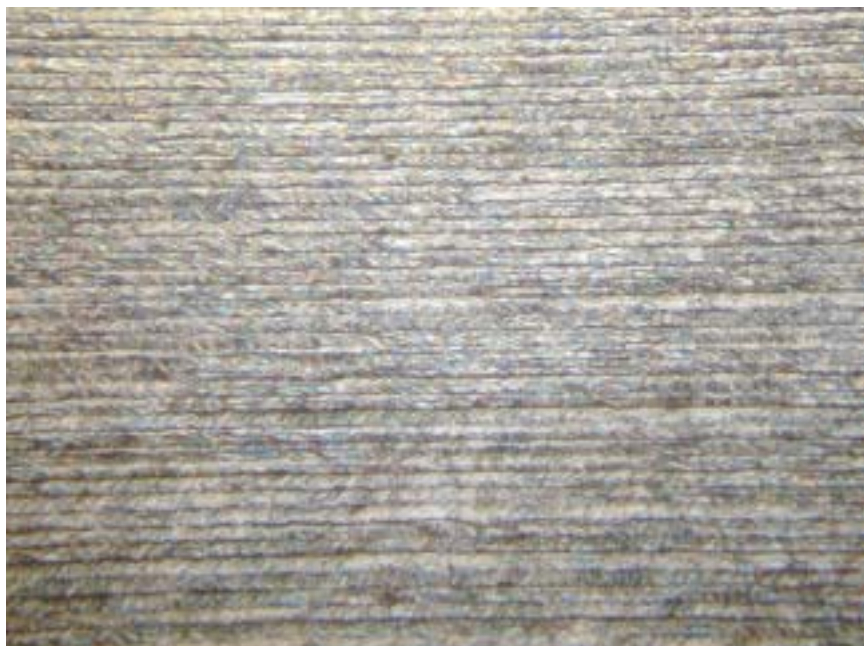


図 2-59 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングで切り込み量 $40\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)



図 2-60 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングで切り込み量 $45\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

・表面粗さの実験結果

一方、表面粗さにおいては図 2-61 をみてわかるように、放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ 加工時と同様に、値は多少前後しているものの、その最大値と最小値の Ry 値の差は垂直方向、平行方向ともに $0.21\text{ }\mu\text{m}$ であることから、表面粗さは切り込み量 (Z) $25\text{ }\mu\text{m}$ 以上ではほぼ一定であるといえる。これより前実験と同じで放電荒加工面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ を加工する際には切り込み値 (Z) が $25\text{ }\mu\text{m}$ 以上であれば表面粗さは、ほとんど変わらないという結果が得られる。しかしながら、顕微鏡写真を見る限り表面には違いが見られるため、同条件で加工する際には Z 値を $40\text{ }\mu\text{m}$ 以上とる必要があると言える。

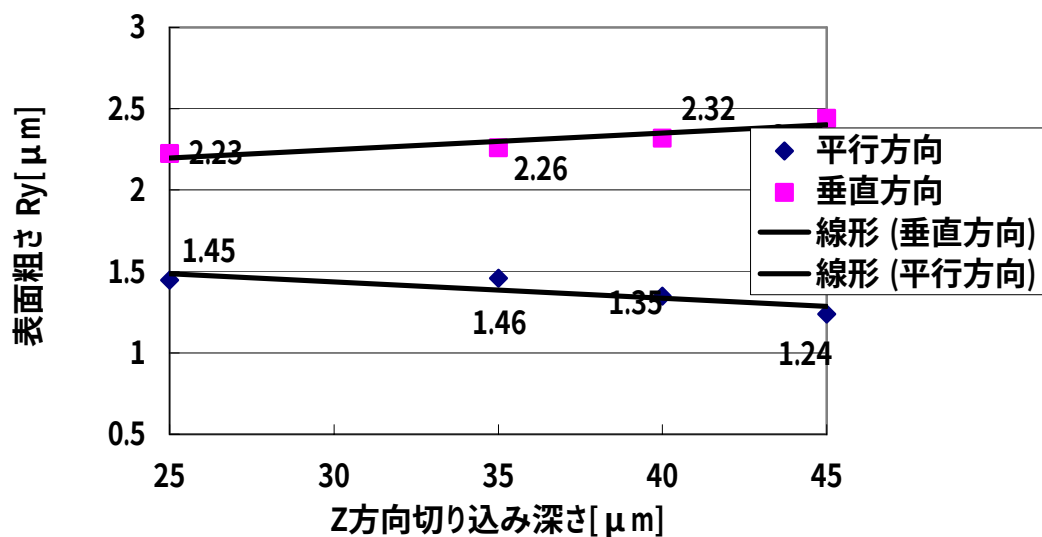


図 2-61 放電荒加工面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ での表面粗さ実験結果

- センサによる Force/Torque の測定結果

本実験での Force/Torque の測定結果グラフを図 2-62～図 2-85 に示す。

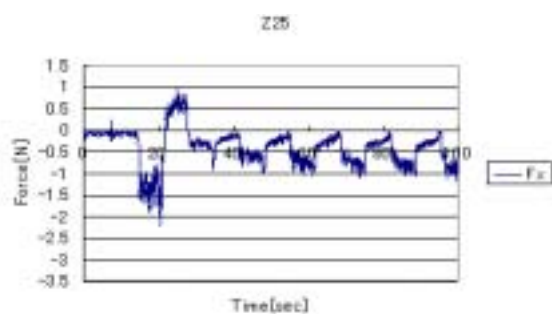


図 2-62 切り込み量 Z25 μm におけるの F_x

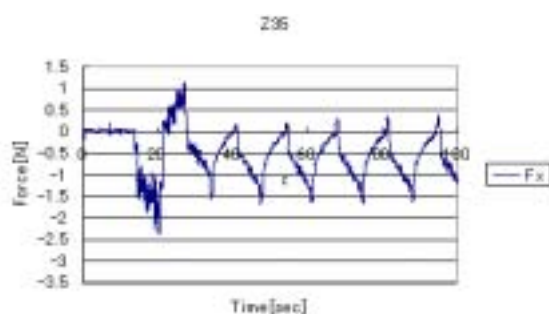


図 2-63 切り込み量 Z35 μm におけるの F_x

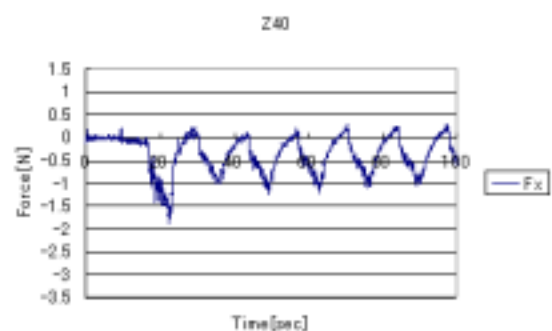


図 2-64 切り込み量 Z40 μm におけるの F_x

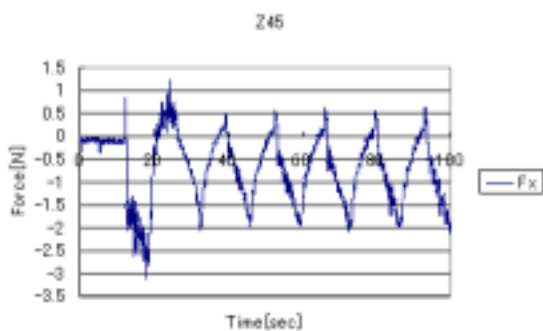


図 2-65 切り込み量 Z45 μm におけるの F_x

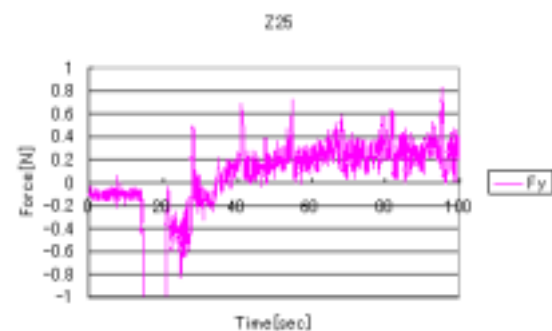


図 2-66 切り込み量 Z25 μm におけるの F_y

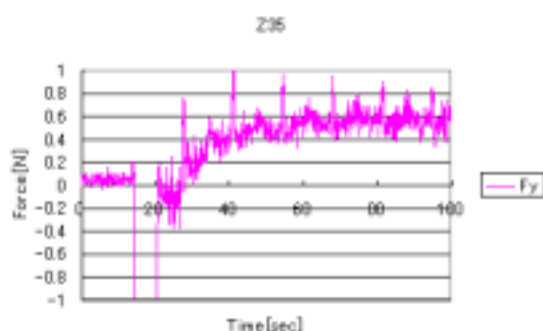


図 2-67 切り込み量 Z35 μm におけるの F_y

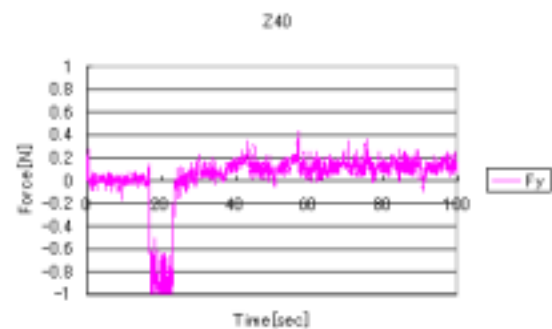


図 2-68 切り込み量 Z40 μm におけるの F_y

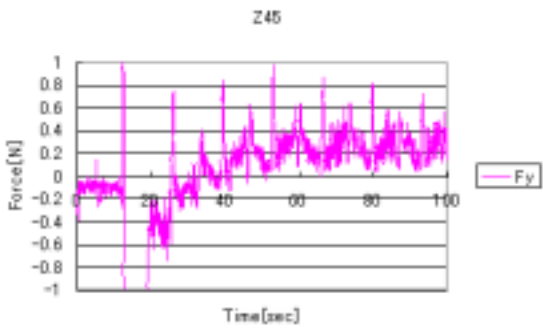


図 2-69 切り込み量 Z45 μm におけるの F_y

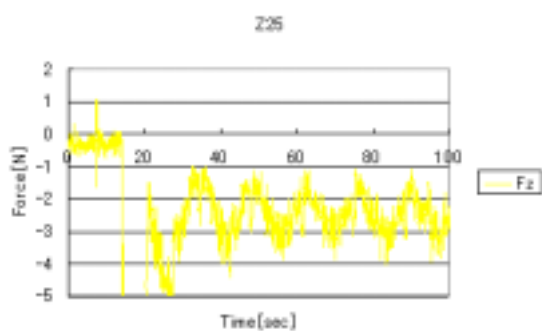


図 2-70 切り込み量 Z25 μm におけるの F_z

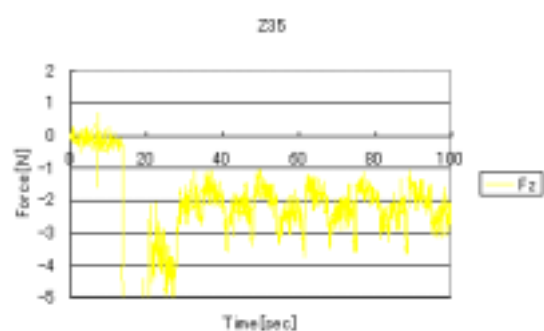


図 2-71 切り込み量 Z35 μm におけるの F_z

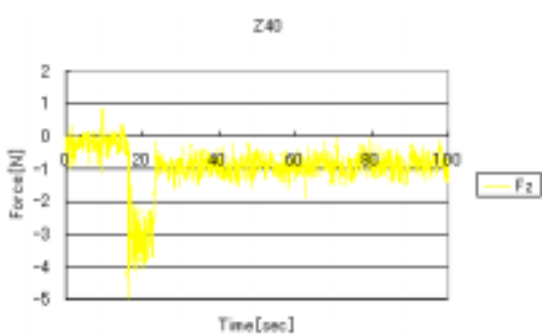


図 2-72 切り込み量 Z40 μm におけるの F_z

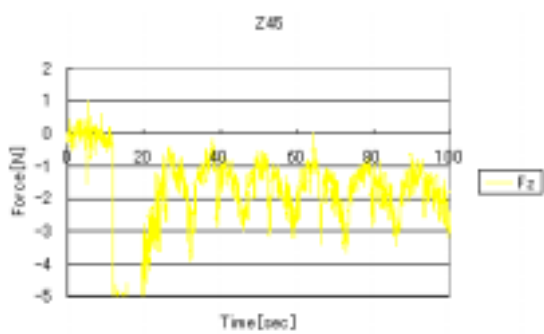


図 2-73 切り込み量 Z45 μm におけるの F_z

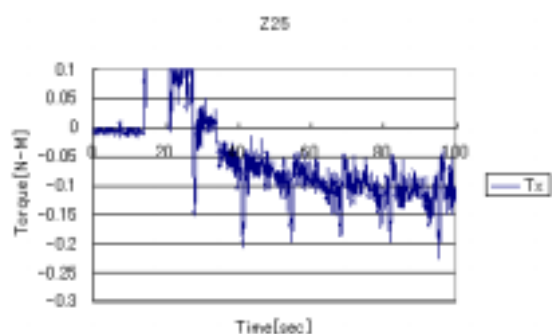


図 2-74 切り込み量 Z25 μm におけるの T_x

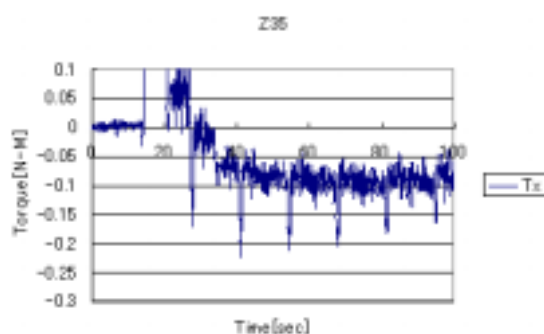


図 2-75 切り込み量 Z35 μm におけるの T_x

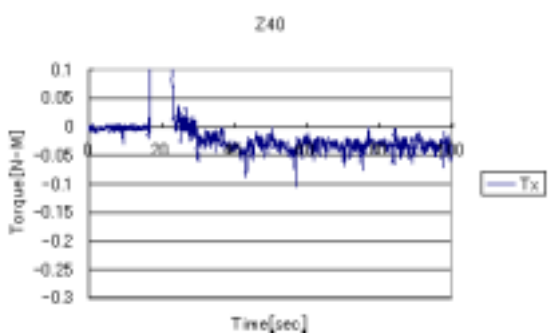


図 2-76 切り込み量 Z40 μm におけるの T_x

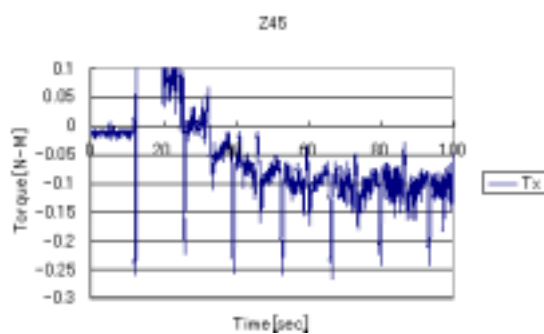


図 2-77 切り込み量 Z45 μm におけるの T_x

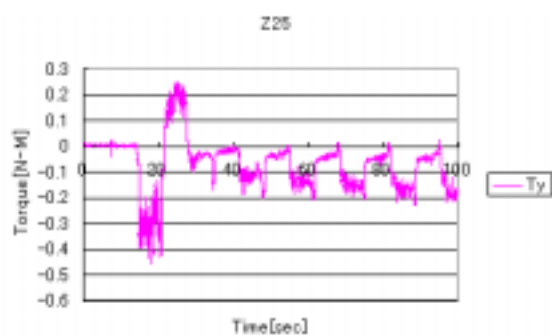


図 2-78 切り込み量 Z25 μm におけるの T_y

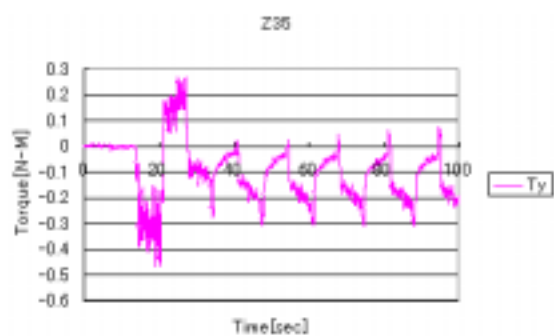


図 2-79 切り込み量 Z35 μm におけるの T_y

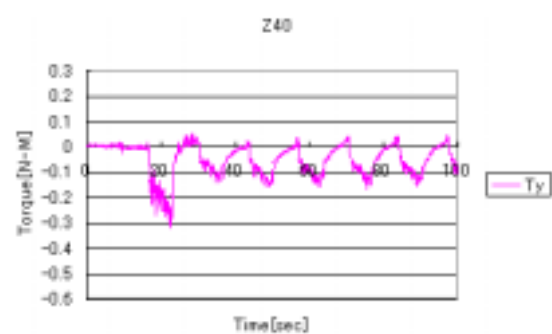


図 2-80 切り込み量 Z45 μm におけるの T_y

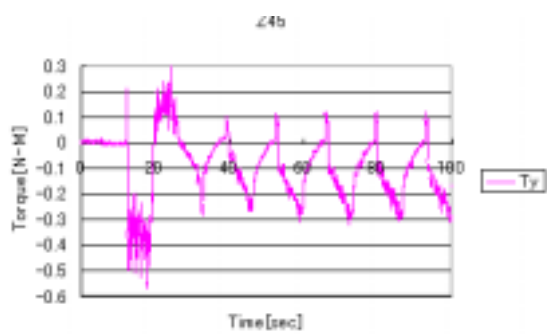


図 2-81 切り込み量 Z45 μm におけるの T_y

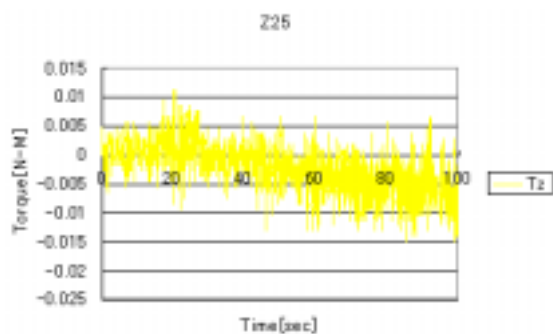


図 2-82 切り込み量 Z25 μm におけるの T_z

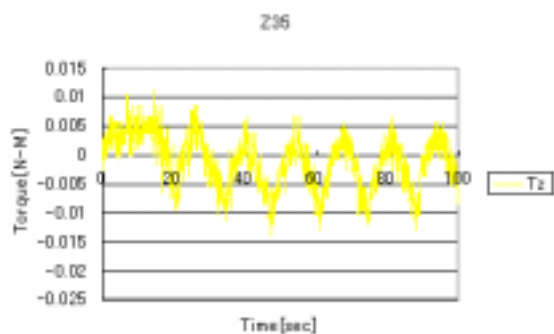


図 2-83 切り込み量 Z35 μm におけるの T_z

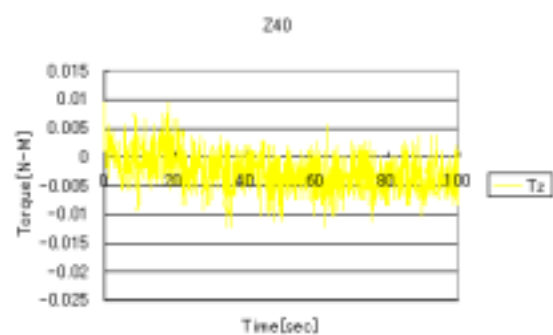


図 2-84 切り込み量 Z40 μm におけるの T_z

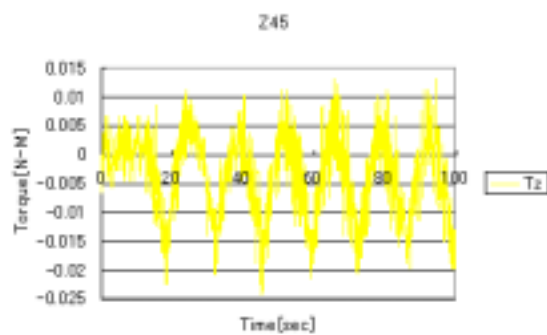


図 2-85 切り込み量 Z45 μm におけるの T_z

・放電荒加工面 25 $\mu\text{m}/\text{Ry}$ における考察

次に図 2-86 と図 2-87 に放電荒加工面 25 $\mu\text{m}/\text{Ry}$ における First Approach の Force 及び Torque を示し、図 2-88～図 2-91 における First Approach 以降の加工方向別の Force と Torque のグラフを示した。また、放電荒加工面 25 $\mu\text{m}/\text{Ry}$ の実験結果と同様に本実験においても、切り込み量(Z)値を 100 μm 、200 μm 、300 μm と三種類を追加しグラフに表示した。図 2-86 の First Approach の Force においては、各軸 F_x 、 F_y 、 F_z ともに切り込み量(Z)の増加とともにプラス方向に増加していることがわかる。

同様に、図 2-87 の First Approach の Torque においては、 T_x はプラス方向に増加し、逆にマイナス方向に増加する結果となり、 T_x 及び T_y は対称的な傾向のグラフだといえる。また、 T_z に関しては First Approach 特有のグラフの増加はみられなかった。

図 2-88 と図 2-89 の加工方向別の Force のグラフについて、プラス方向、マイナス方向の加工ともそれぞれ、切り込み量(Z)に対する変化は微小であり、プラス方向の F_z を除いてはその差の最大値は 1[N]以内である。加工方向プラス方向の F_z に関しては、切り込み量(Z)値が 25 μm ～45 μm において、最大でおよそ 2[N]程度の差があるが、100 μm ～300 μm における F_z 値の変化がごく微細であり一定といえるため、切り込み量(Z)値 25 μm ～45 μm における F_z 値は、切り込み量(Z)値の変化が 5 μm と細かい設定のため、測定によるばらつきであると考えられ、 F_z についても一定であると推測できる。次に、図 2-90 と図 2-91 の加工方向別の Torque のグラフについても Force と同様の測定結果が得られ、X、Y、Z それぞれの軸において一定といえる。

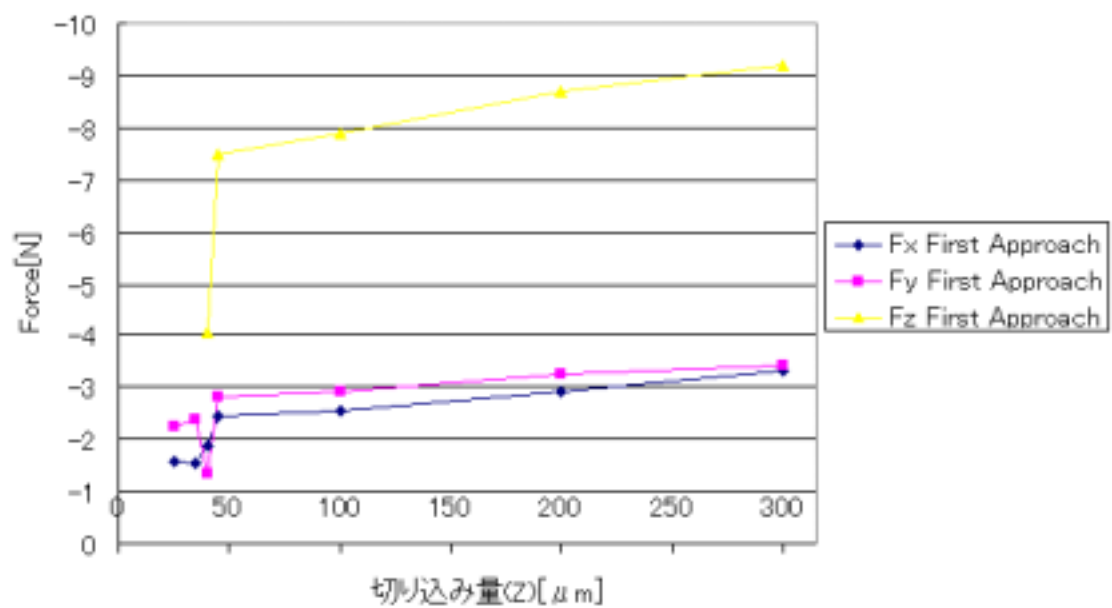


図 2-86 First Approach における Force

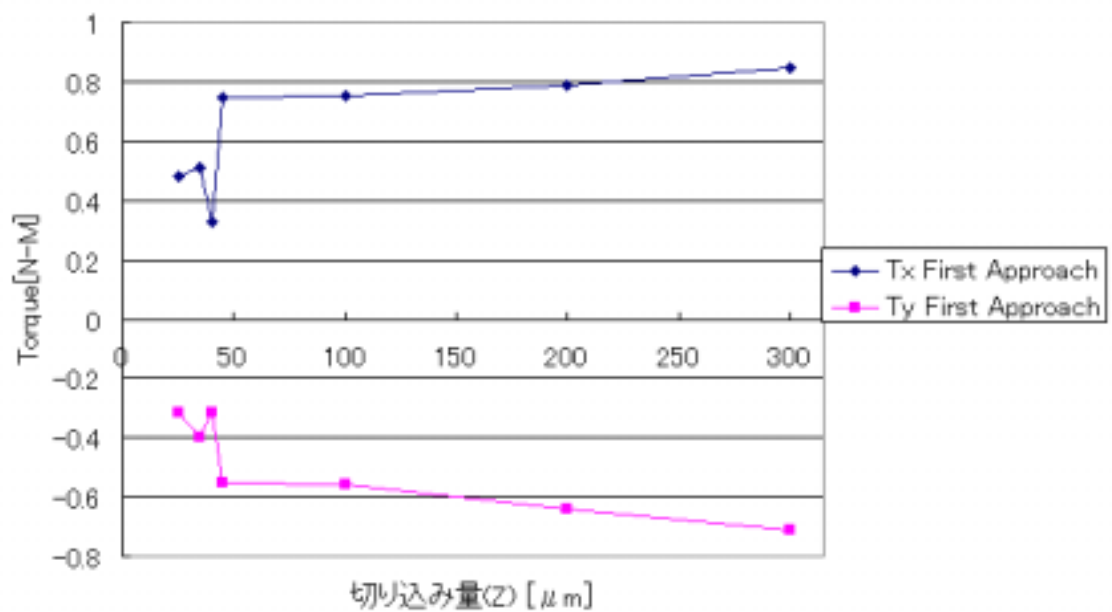


図 2-87 First Approach における Torque

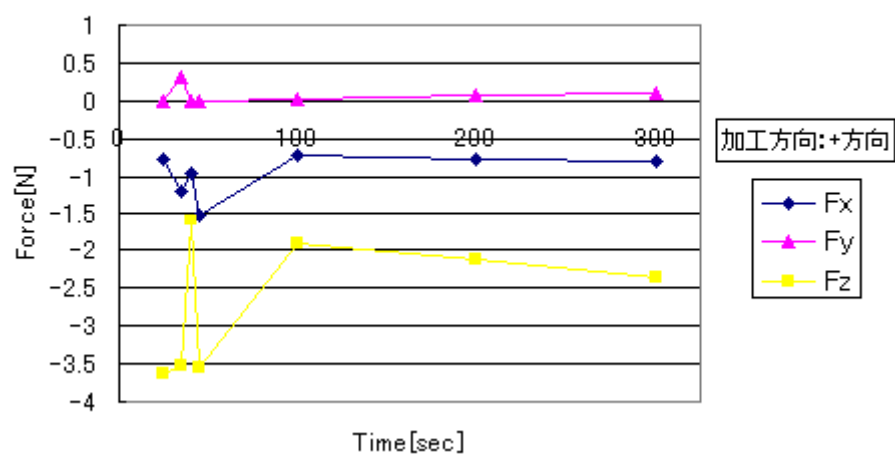


図 2-88 加工方向プラス方向における Force

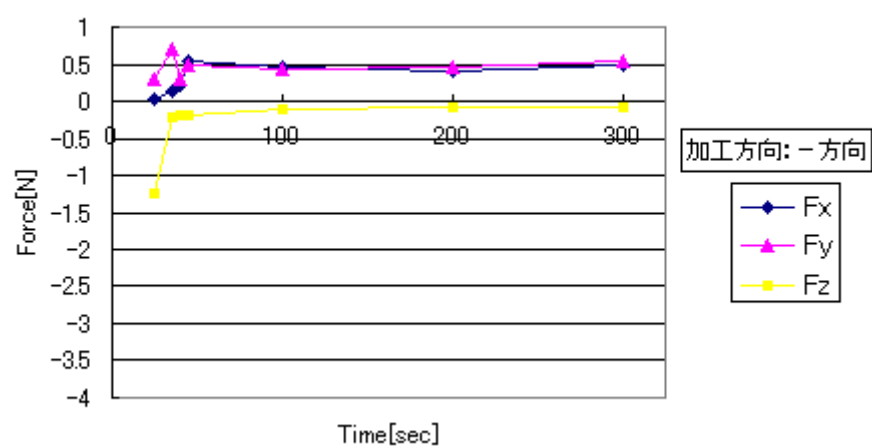


図 2-89 加工方向マイナス方向における Force

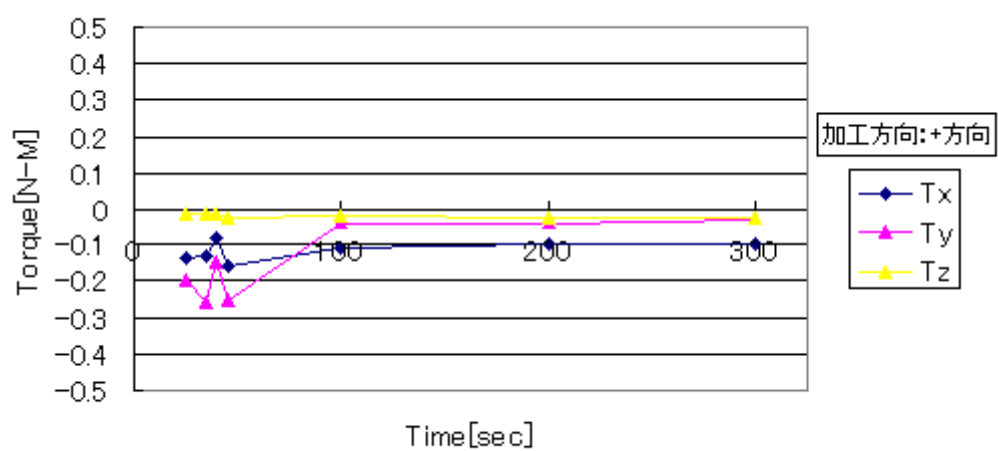


図 2-90 加工方向プラス方向における Torque

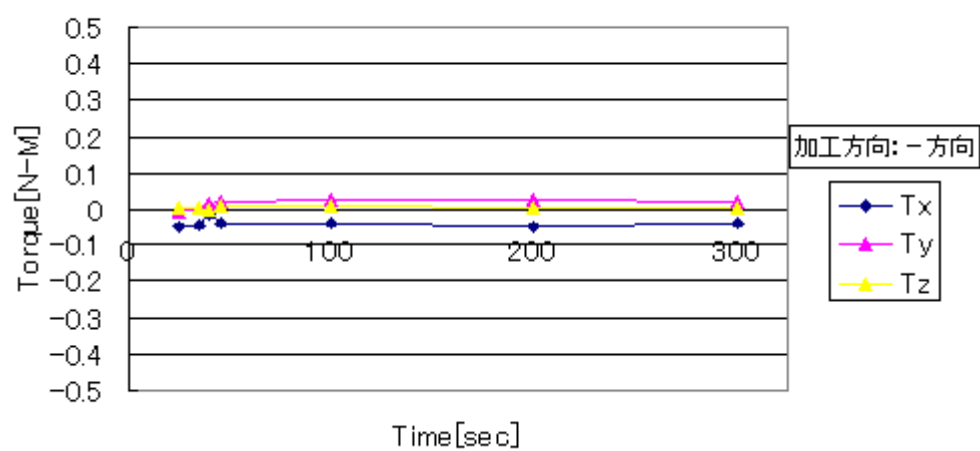


図 2-91 加工方向マイナス方向における Torque

2.3.4 結言

以上の結果より放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ と $25\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ 表面それぞれに切り込み量(Z)を変化させ超高速回転ミーリングを施した場合、どちらの放電面に対しても同様の結果を得ることが出来、お互いに最低切り込み量 (Z) の値が明確となった。どちらの表面についても、それ以下の切り込み量の値で加工した場合は切り残り放電痕が残留してしまい表面精度は低下する傾向になることが判明した。

実験より放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ の時は必要最低切り込み量 (Z) は $25\ \mu\text{m}$ 、放電荒加工面 $25\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ では (Z) $40\ \mu\text{m}$ 以上となることがわかったが、ここで双方の (Z) 値は、表面粗さ Ry 値の 1.7 倍であり、これらをふまえると最低必要切り込み量 (Z) 値は、放電荒加工面の表面粗さ Ry 値の 1.7 倍であることが実験より判明した。この結果を踏まえて各放電荒加工面を切削する際の切り込み量を推測したグラフを図 2-92 に示す。

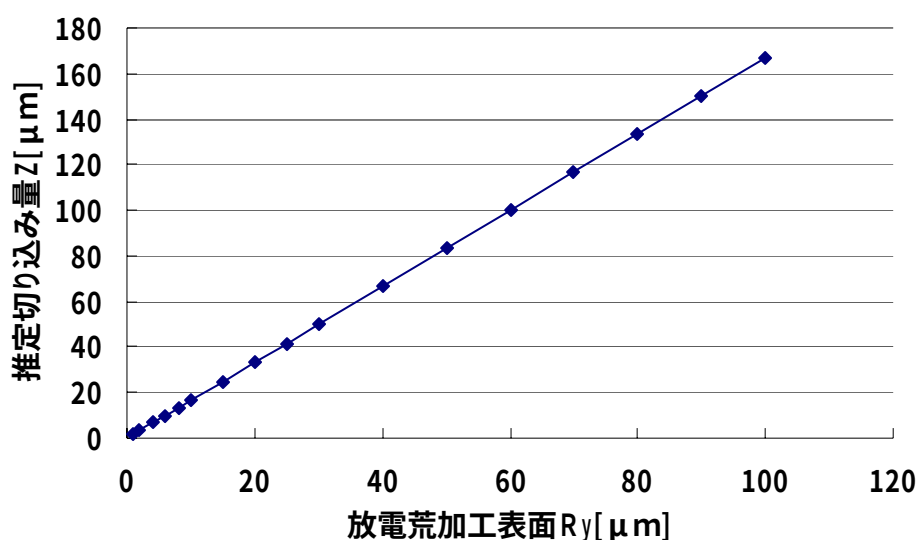


図 2-92 推定切り込み量 Z

一方、表面粗さについてはどちらの条件下においてもほぼ一定であるという結果が得られ、加工の際に万一切り残り放電痕が存在した場合でも表面粗さにはあまり影響を及ぼさないということになるが、Z 値が実験値以下になると表面粗さは劣化することが予測できる。また Z 値の増減が表面粗さにあまり影響を及ぼさないにしても、表面の写真进行分析する限り違いを確認でき、切り込み量の選定に関しては表面顕微鏡写真に依存する必要があることになる。

Force/Torque については、放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ と $25\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ の加工において同様の結果を得ることができたといえる。加工データでは全ての要素の増分が一定もしくは

は微小に増減という結果を得た。ここで、MS 20 を用いて Z 値の変化量に伴う切削量の変化値の概要を図 2-93 に示す。図中の①に示す部分は Z 値を最適切り込み量とされる $25\mu\text{m}$ より切り込みを $10\mu\text{m}$ 増加させたときに生じる切削量であり、②・③は同様に切り込み値を $20\mu\text{m}$ ・ $30\mu\text{m}$ と増加させたものである。Force/Torque のグラフによるとその値の増減は、ほぼ一定であるという結果を得たが、これは図よりわかるように切削量の増分が極微小であるためであると思われる。

しかしながら、初回の加工、すなわち First Approach においてはその切削量の増分は一定ではないことから、Force/Torque についてはこの First Approach の変化量をより考察することが必要であると言える。First Approach では、各軸の F_x 、 F_y 、 F_z は切り込み量(Z)の増加と共に対数的なプラス方向への増加傾向となった。また、Torque については、 T_x はプラス方向に増加し、逆にマイナス方向に増加する結果となり、 T_x 及び T_y は対称的に変化し、これも対数的グラフだといえるため、First Approach については対数で近似式を得ることが出来るものではないかと推測する。この傾向は、 $15\mu\text{m}/R_y$ よりも $25\mu\text{m}/R_y$ について著しく見られたが、 $15\mu\text{m}/R_y$ もこれと同様の変化を取るものと思われる。

また、本実験の Z 値の変化量は微小であり、さらに加工の際に凹凸状の放電加工面において端面位置決めを行なっているために測定値は多少の誤差を生じているものと思われる。すなわち、表面粗さ R_y 値が増加するにつれて端面位置決め時の誤差も大きくなるものであるといえる。

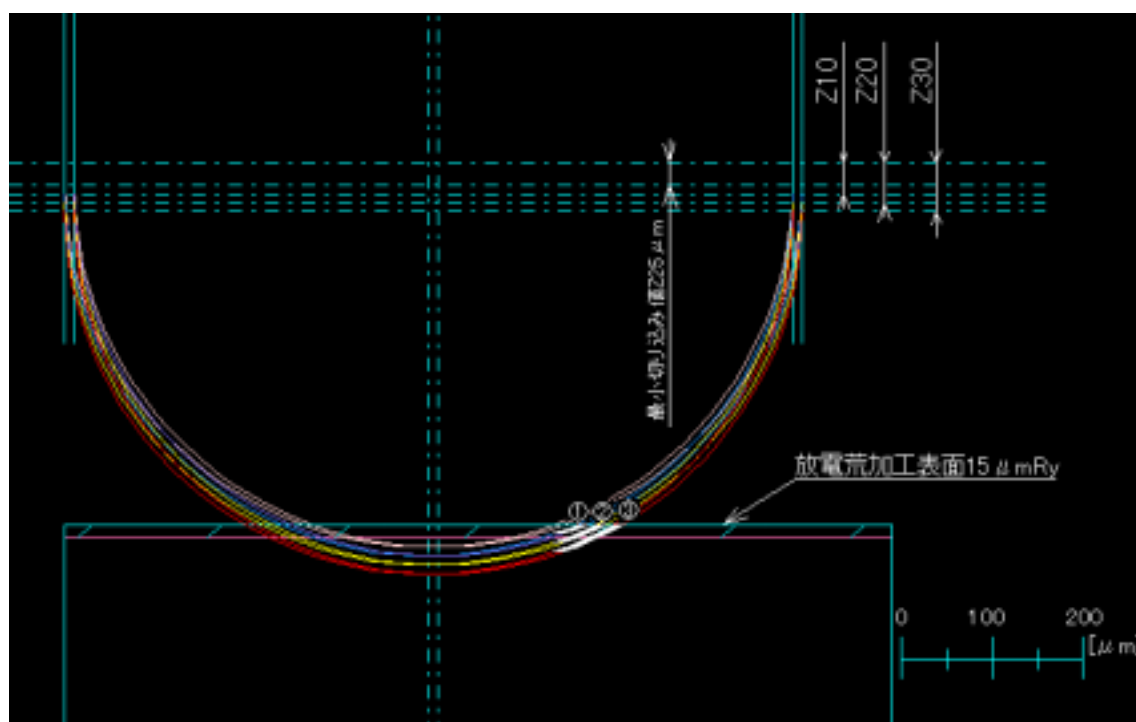


図 2-93 切り込み量 Z 値の変化量に伴う切削量の変化値の概要図

・加工表面の性質について

通常、放電加工後の表面は加工変質層が形成されており、その際表面は、金型寿命に最も良くないとされる数 μm ～数十 μm の白層ができているので、加工表面を除去するための2次加工を行う必要が生じる⁶⁾。白層とは、放電加工時に溶融した材料の一部が除去されずに残留し、再凝固した(焼入れされた)層であり、その表層部には、電極材料の蒸発、溶融・飛散除去されたものの一部と、加工液(油の場合)の燃焼生成炭素物質が付着して浸炭作用も受けた加工(放電)面を形成しているものである。この層には、微小なクラックも発生し、また再凝固時に生じる引張りの残留応力が働いているといわれていることから、白層が存在したまま金型として使用すると欠けや割れに繋がってしまうとされている⁷⁾。

本実験に用いた放電加工を施したワークにおいても白層を確認することができることから、ここでは切り込み量 Z と白層の除去について述べる。

図2-94は放電面 $1.48\mu\text{m/Ry}$ の断面を処理し、表面の変質層を可視できるようにした写真である。図より、断面の最上面に白層が均等に存在していることがわかる。また、図2-95は放電面 $25\mu\text{m/Ry}$ の断面写真であるが、この写真では白層が層状ではなく局部的に発生している。これは図2-95に示す放電加工面 $1.48\mu\text{m/Ry}$ の写真では見られないことや、荒加工断面によく存在していることから、局部的に大きい白層は荒加工において生成されるものと推測することができる。

本実験に用いた放電荒加工のみを施した表面 $15\mu\text{m/Ry}$ と $25\mu\text{m/Ry}$ のワークの断面写真を図2-96、図2-97に示す。図2-96と図2-97を写真の上で比べる限り放電加工面 $15\mu\text{m/Ry}$ の方が白層の厚さが小さいことがわかる。また図2-94も念頭において考察する限り白層は表面粗さが小さくなるにつれて減少する傾向にあると言える。以上の結果を表2-11と図2-98に示す。図2-98より白層の厚さと表面粗さ Ry はほぼ比例関係にあるといえる。ここで、図に示す最低切り込み量は実験より求めた数値であることから、選定した切り込み量を用いて加工を行う限り、切削仕上げ加工によって白層を除去できるといえるものである。また、図2-99は実験より選定

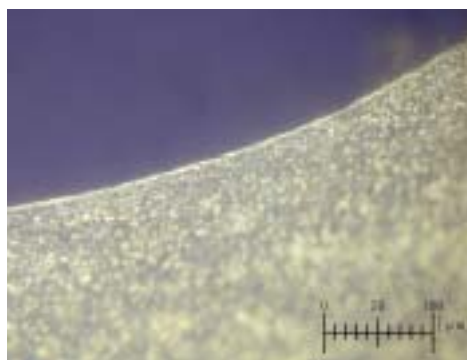


図2-94 放電面 $1.48\mu\text{m/Ry}$ 断面写真($\times 500$)

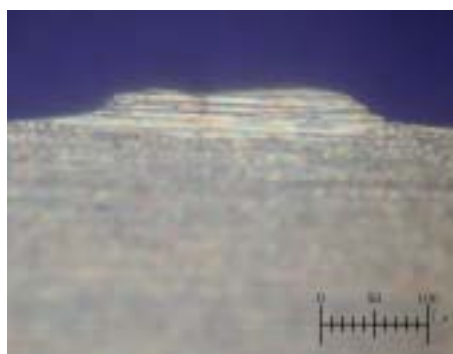


図2-95 放電面 $25\mu\text{m/Ry}$ 断面写真($\times 500$)

した切り込み量 Z で放電面を加工した断面写真であり、写真右端に見える白層部分が切削時の切込みによって除去できていることがこの写真からも判断できる。したがって、複合加工法を用いることによって仕上げ加工と表面処理が同時にできたものと言える。

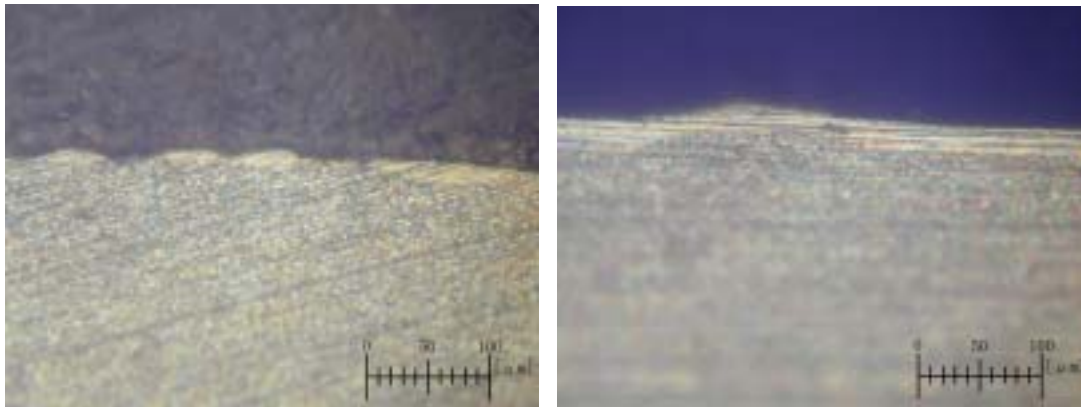


図 2-96 放電面 15 $\mu\text{m}/\text{Ry}$ 断面写真($\times 500$) 図 2-97 放電面 25 $\mu\text{m}/\text{Ry}$ 断面写真($\times 500$)

表 2-11 放電加工表面 R_y と白層の関係

	放電加工面 1.48 $\mu\text{m}/\text{Ry}$	放電加工面 15 $\mu\text{m}/\text{Ry}$	放電加工面 25 $\mu\text{m}/\text{Ry}$
平均厚さ[μm]	1.5	6.85714286	12.4657534
最大厚さ[μm]	2	14	25

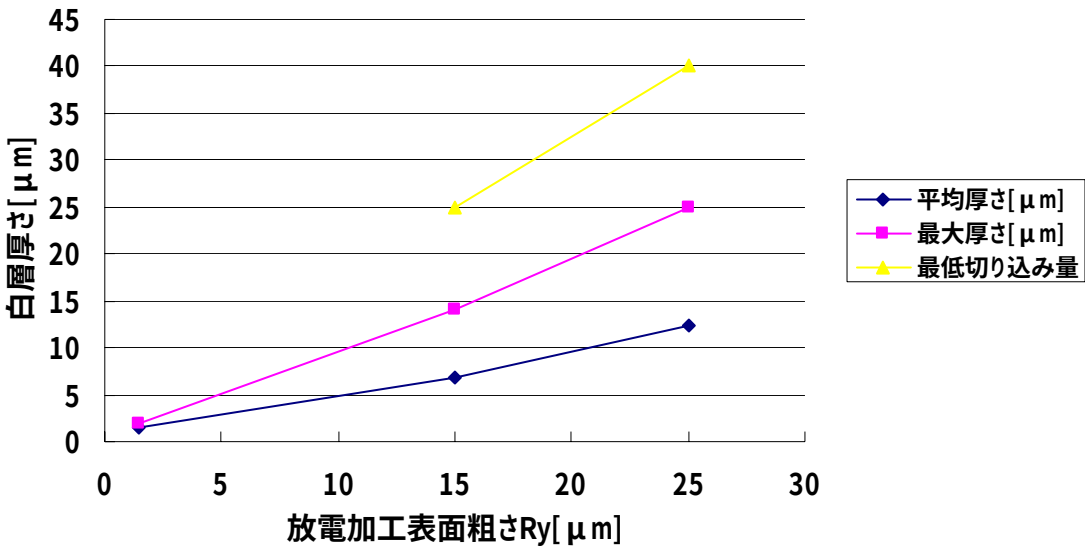


図 2-98 放電加工表面 R_y と白層の関係

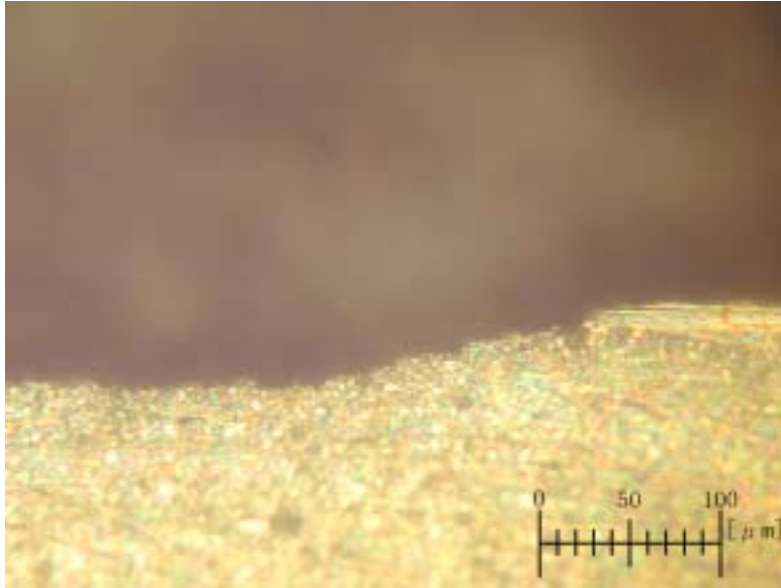


図 2-99 白層と選定切り込み量

2.4 放電面における超高速回転ミーリング最小切り込み量での最大ピック量の選定

2.4.1 実験概要

本実験では先の実験で求めた切り込み値において加工する際の最低必要限とされるピック値を選定する。ここで、ピック量とは、図 2-100 に示す Y 値のことであると規定する。ピック量 Y を変化させて加工し、各々の表面粗さ、加工の際に付加する Force/Torque を測定し、適切なピック値を求める。

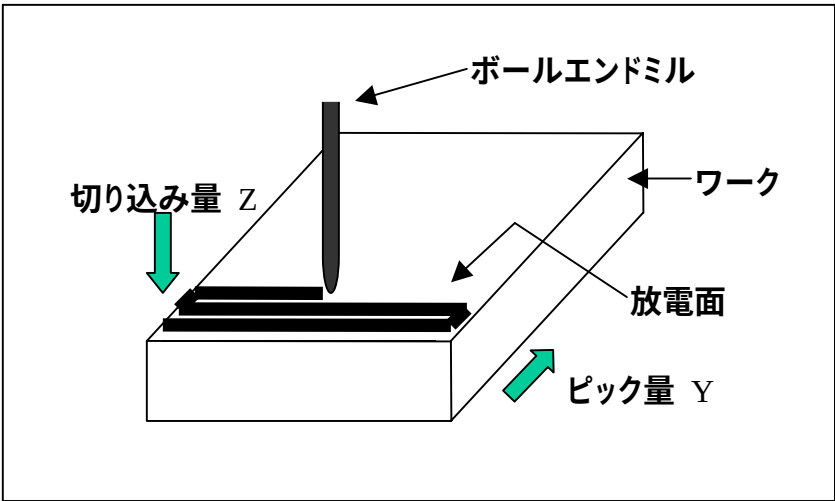


図 2-100 超高速回転ミーリング加工パターン図

2.4.2 実験方法

形彫り放電加工機において荒加工を行い加工表面粗さ $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ 及び $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ のワーク材料を作成する。作成したワーク材料において表 2-12 に示す加工条件下において、表 2-13 に示す実験条件を変化させて実験を行う。

表 2-12 加工条件

	放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$	放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$
被加工物	SK5	SK5
電極材料	Cu	Cu
送り[mm/min]	100	100
主軸回転数[rpm]	40000	40000
切り込み量 Z[μm]	25	40
ボールエンドミル直径[mm]	0.8	0.8
加工液液面高さ[mm]	20	20

表 2-13 ピック量

	放電面 15 $\mu\text{m/Ry}$	放電面 25 $\mu\text{m/Ry}$
ピック量 〔 μm 〕	10	10
	50	20
	75	25
	100	30
		50
		75
		100

2.4.3 実験結果

(1)放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ に対して加工した実験結果

・顕微鏡写真による実験結果

顕微鏡写真を図 2-101～図 2-104 に示したとおり、ピック量 (Y) $10\text{ }\mu\text{m}$ 、及び $50\text{ }\mu\text{m}$ においては、超高速回転ミーリングによる切り残しは、ほとんど確認できない。一方、ピック量 (Y) $75\text{ }\mu\text{m}$ 、及び $100\text{ }\mu\text{m}$ においては、超高速回転ミーリングのカッター筋との間に、切り残しと見られる顕微鏡写真での黒い部分が確認できる。

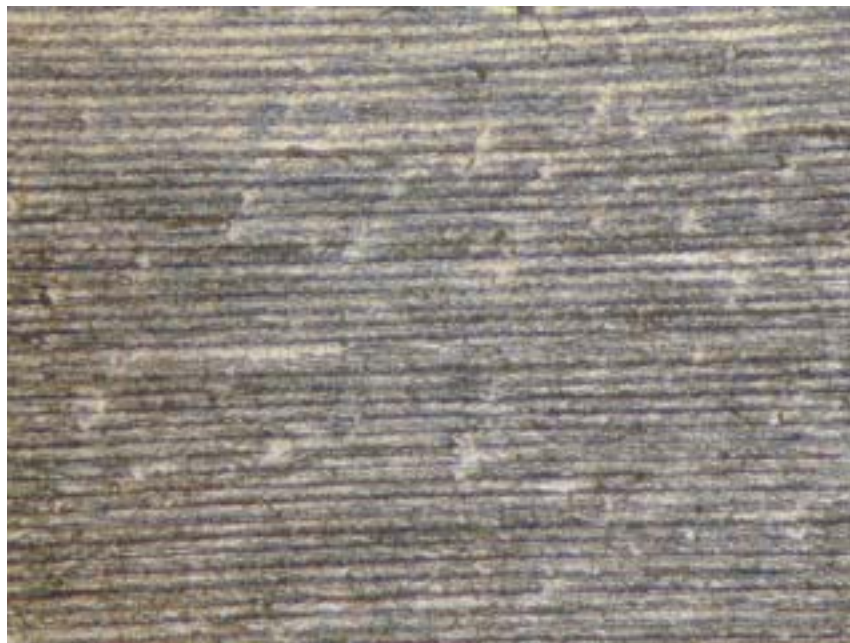


図 2-101 放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $10\text{ }\mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真($\times 100$)



図 2-102 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $50\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真($\times 100$)

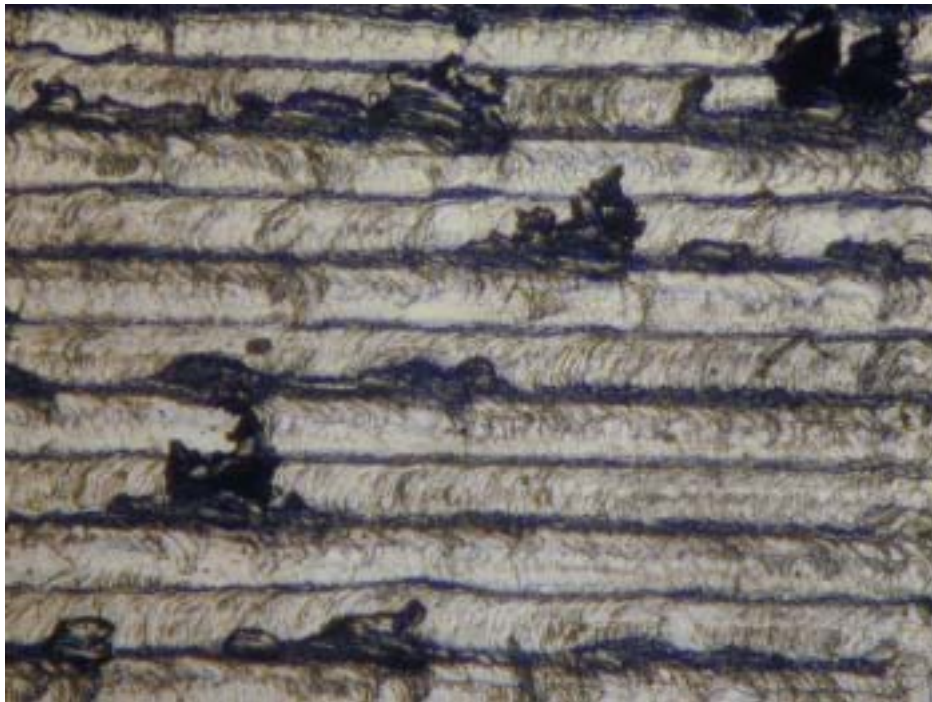


図 2-103 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $75\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真($\times 100$)

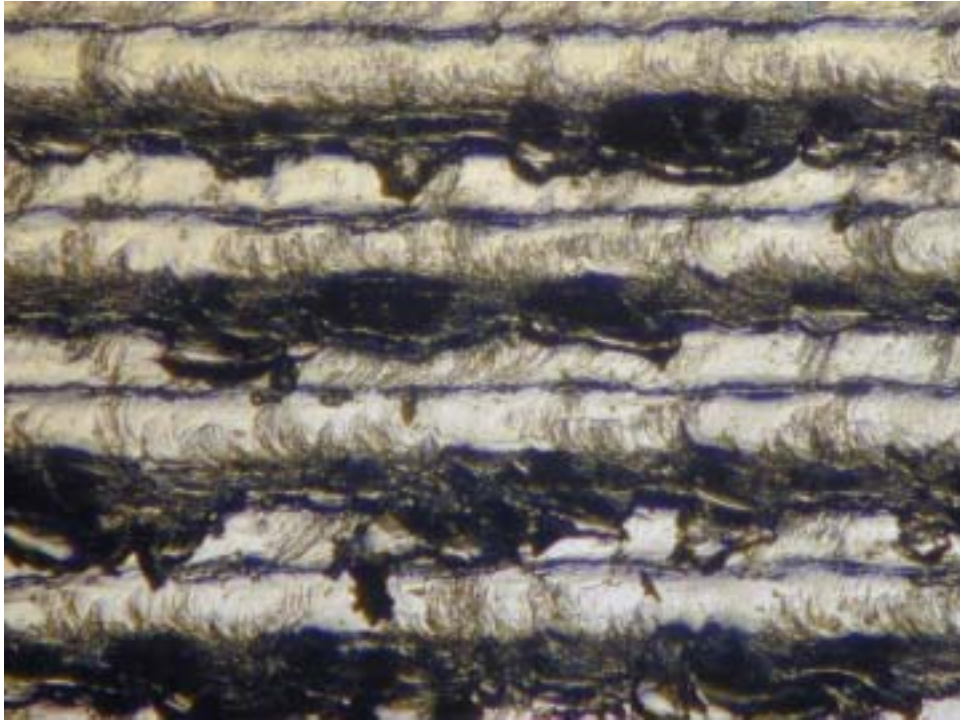


図 2-104 放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $100\text{ }\mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真($\times 100$)

・表面粗さの実験結果

次に、表面粗さを図 2-105 に示したが、まず平行方向の表面粗さ R_y 値においては、ピックアップ量 (Y) が増加するごとに、若干ではあるが表面粗さが増加する傾向にあり、ピックアップ量 (Y) $100\mu\text{m}$ と $10\mu\text{m}$ との表面粗さ R_y 値の最大値と最小値は、 1.49 程度でありほぼ一定といえる。一方、垂直方向において表面粗さ R_y は、ピックアップ量 (Y) が $10\mu\text{m}$ と $50\mu\text{m}$ の場合は、双方の差が、 $0.19\mu\text{m}$ でありほぼ一定の表面粗さといえる。また、ピックアップ量 (Y) が、 $75\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ においては、表面粗さはピックアップ量に比例し増大しており実用的ではないといえる。つまり、ピックアップ量 (Y) は、 $50\mu\text{m}$ を超えると急激に増大することがわかる。これらの結果より、顕微鏡写真と表面粗さとの双方の結果が共に $50\mu\text{m}$ となり、切り残しが発生しないピックアップ量 (Y) の最大値は、 $50\mu\text{m}$ ということがわかった。

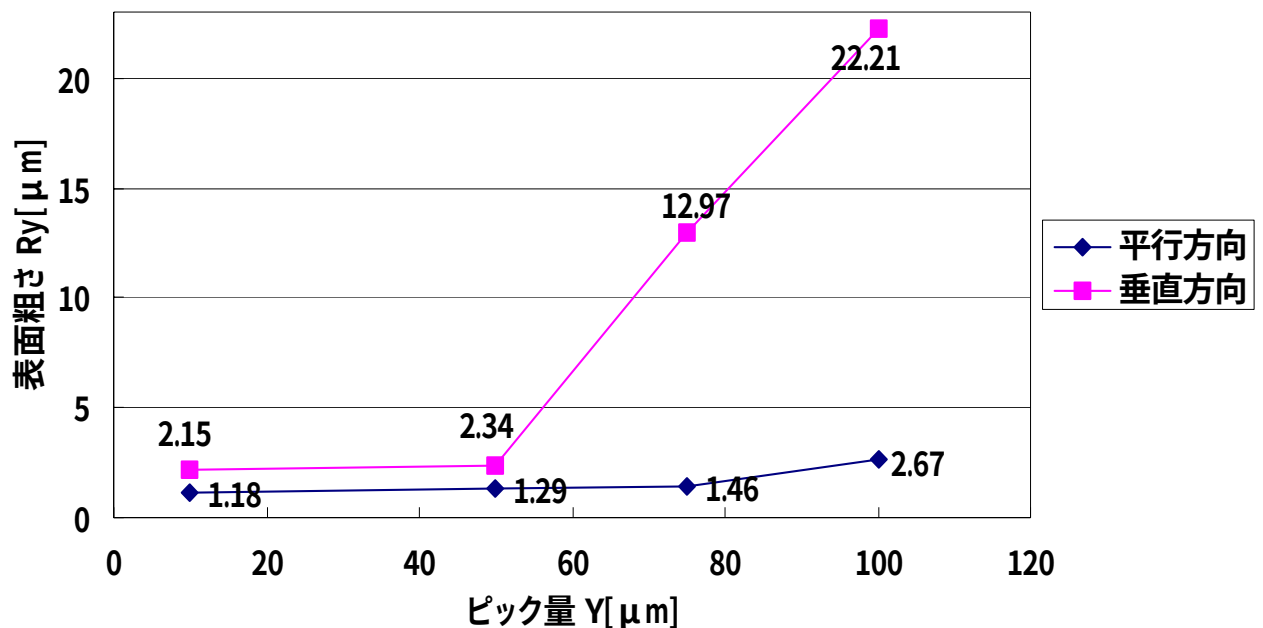


図 2-105 放電荒加工面 $15\mu\text{m}/R_y$ でのピックアップ量変化の表面粗さ実験結果

・センサによる Force/Torque の測定結果

図 2-106～図 2-129 に Force/Torque 測定データを示す。

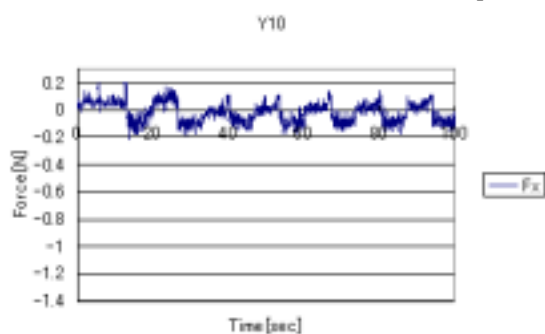


図 2-106 ピック量 Y10 μm におけるの F_x

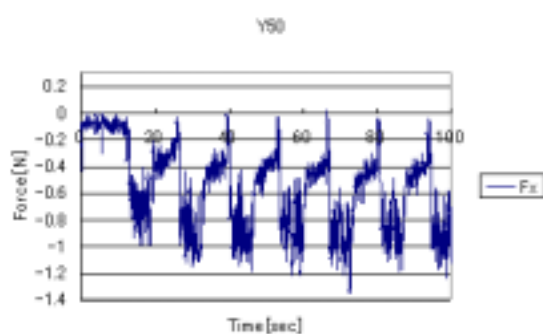


図 2-107 ピック量 Y50 μm におけるの F_x

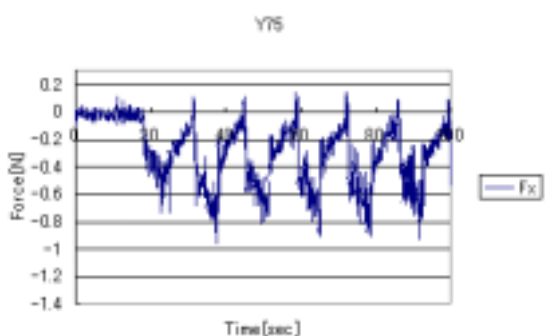


図 2-108 ピック量 Y75 μm におけるの F_x

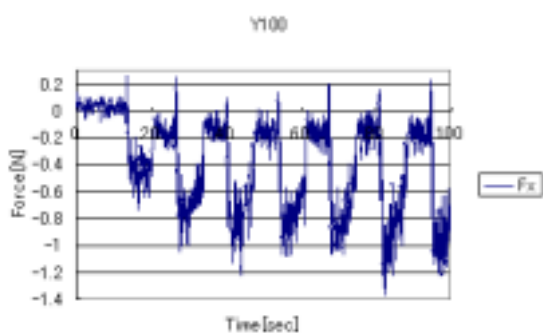


図 2-109 ピック量 Y100 μm におけるの F_x

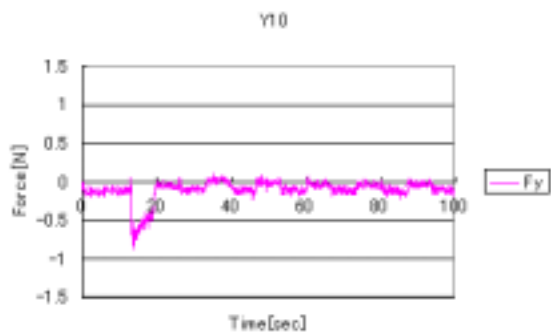


図 2-110 ピック量 Y10 μm におけるの F_y

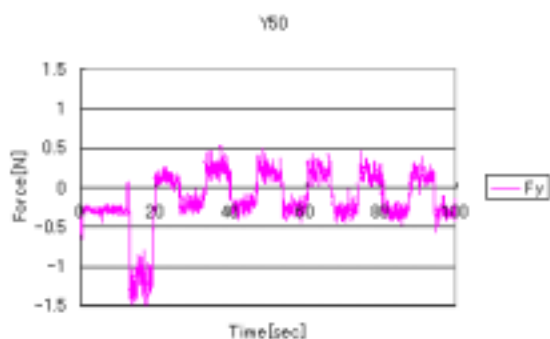


図 2-111 ピック量 Y50 μm におけるの F_y

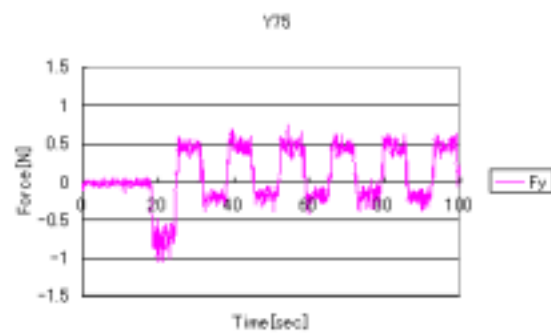


図 2-112 ピック量 Y75 μm におけるの F_y

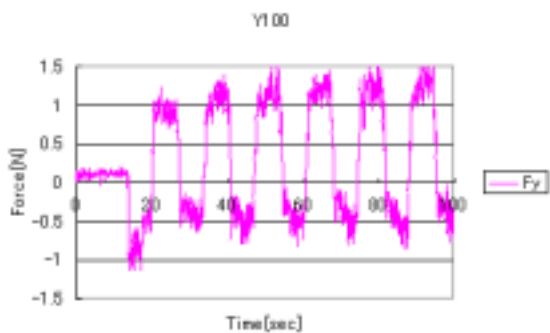


図 2-113 ピック量 Y100 μm におけるの F_y

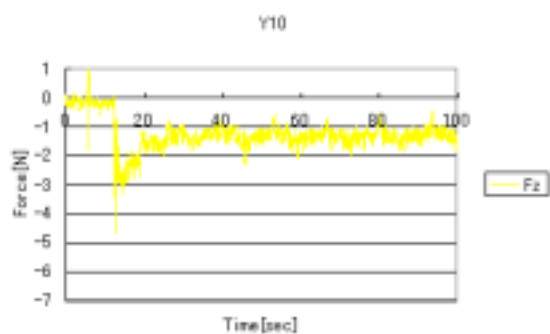


図 2-114 ピック量 Y10 μm におけるの F_z

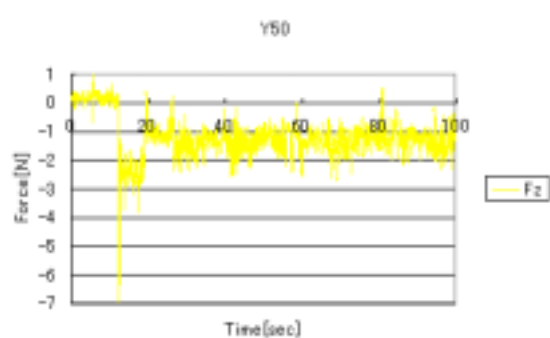


図 2-115 ピック量 Y50 μm におけるの F_z

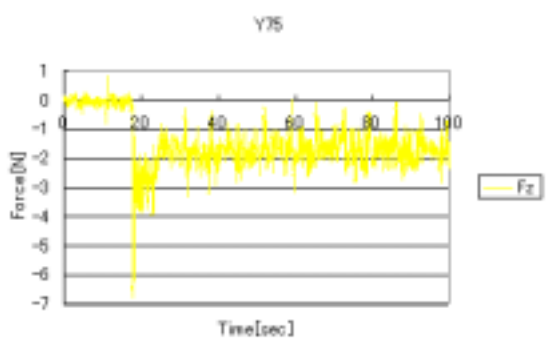


図 2-116 ピック量 Y75 μm におけるの F_z

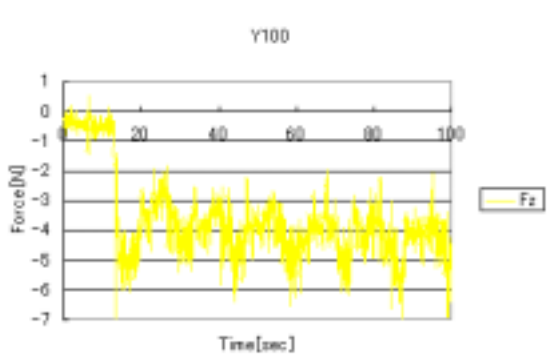


図 2-117 ピック量 Y100 μm におけるの F_z

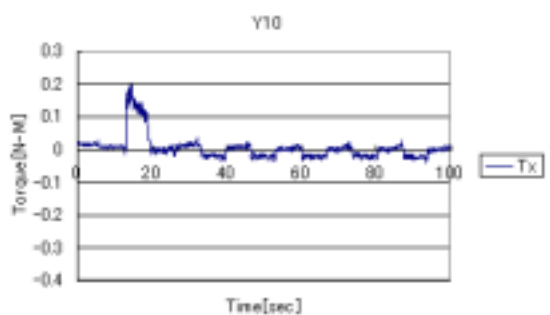


図 2-118 ピック量 Y10 μm におけるの T_x

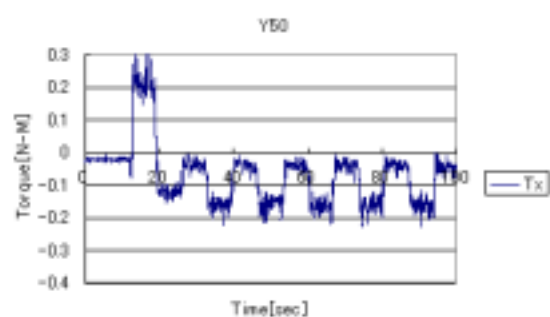


図 2-119 ピック量 Y50 μm におけるの T_x

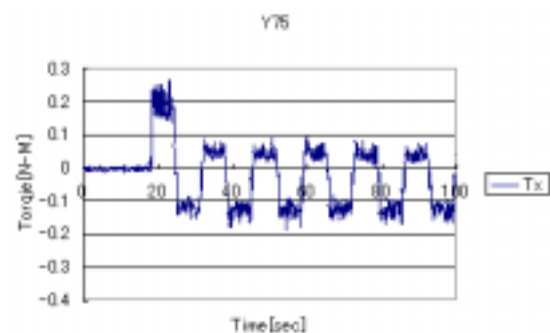


図 2-120 ピック量 Y75 μm におけるの T_x

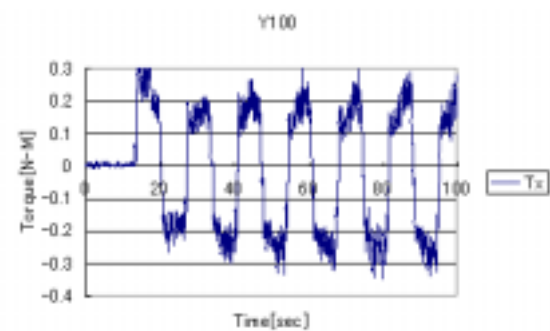


図 2-121 ピック量 Y100 μm におけるの T_x

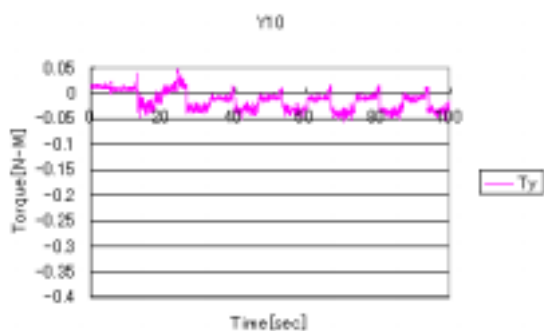


図 2-122 ピック量 Y10 μm におけるの T_y

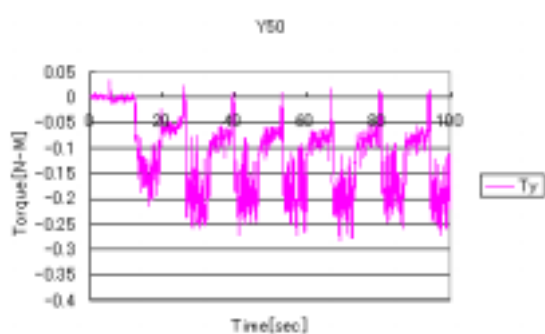


図 2-123 ピック量 Y50 μm におけるの T_y

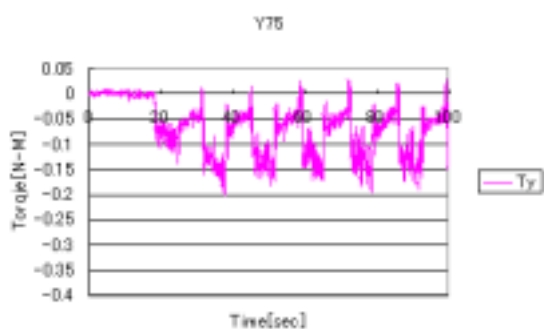


図 2-124 ピック量 Y75 μm におけるの T_y

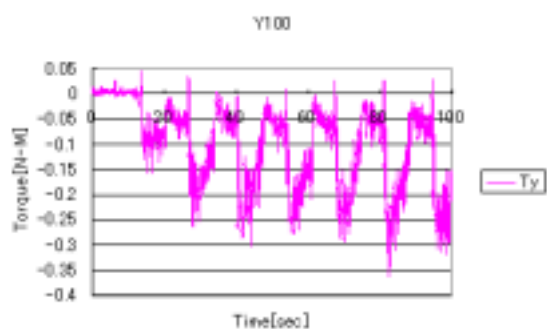


図 2-125 ピック量 Y100 μm におけるの T_y

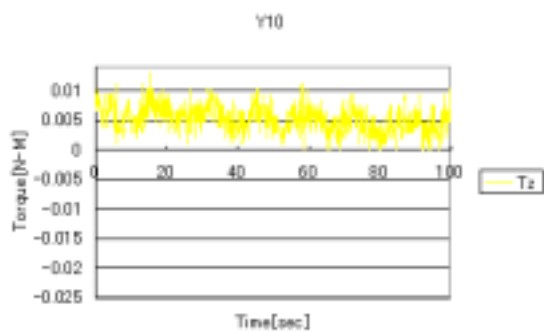


図 2-126 ピック量 Y10 μm におけるの T_z

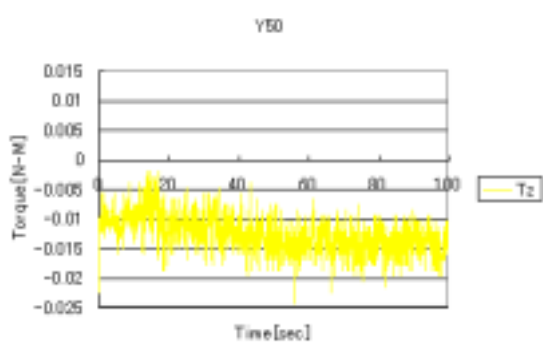


図 2-127 ピック量 Y50 μm におけるの T_z

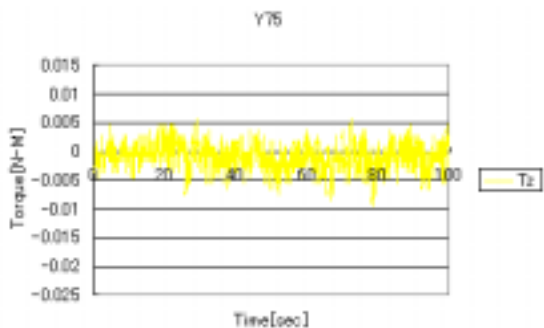


図 2-128 ピック量 Y75 μm におけるの T_z

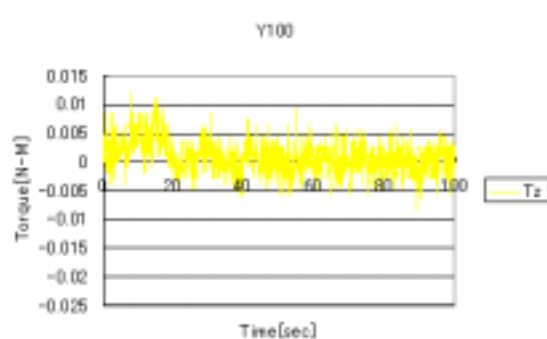


図 2-129 ピック量 Y100 μm におけるの T_z

・放電荒加工面 $15\ \mu\text{m/Ry}$ における考察

図 2-130 と図 2-131 にそれぞれ本実験における放電荒加工面 $15\ \mu\text{m/Ry}$ における加工方向プラス方向及びマイナス方向の Force を示した。図 2-130 におけるプラス方向の加工においては、 F_x 及び F_y のピック量(Y)値の変化に伴う差は、最大でも $0.5[\text{N}]$ 程度でありピック量に対する F_x 、 F_y は一定であるといえる。逆に、 F_z に関してはピック量(Y)値の増加とともにマイナス方向へ増加する傾向となった。図 2-131 におけるマイナス方向の加工においては、 F_x は、ほぼ一定といえ、 F_y においてはピック量(Y)値の変化に伴う差の最大値は $1.5[\text{N}]$ でありピック量(Y)値の増加に伴い若干の増加傾向にあるものでないかと思われる。 F_z に関しては、ピック量(Y)値の増加に伴いその差の最大値は $2[\text{N}]$ でありマイナス方向に大きく増加している結果となった。

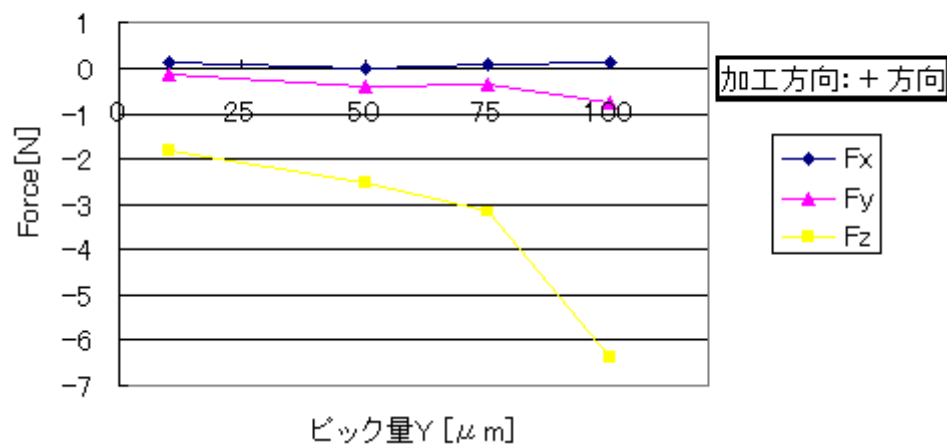


図 2-130 加工方向プラス方向における Force

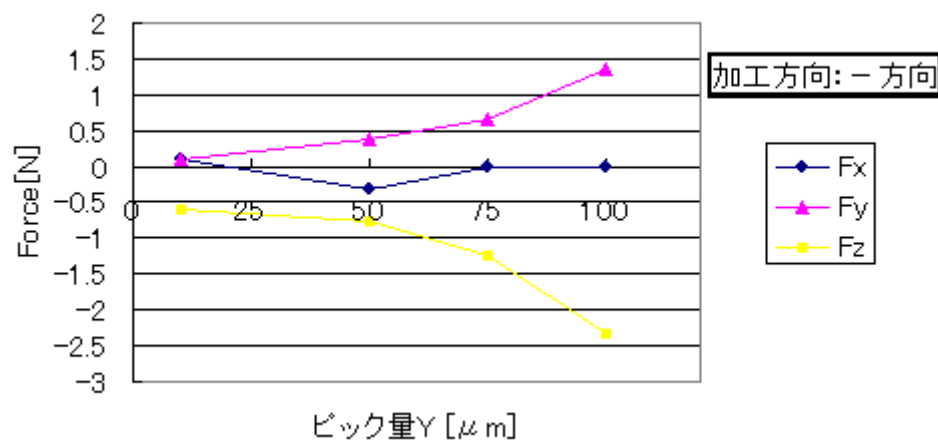


図 2-131 加工方向マイナス方向における Force

次に同様に、加工方向プラス方向及びマイナス方向の Torque のグラフをそれぞれ図 2-132 と図 2-133 に示した。図 2-132 においての加工方向プラス方向における Torque は、ピック量(Y)値の増加に伴い T_x はプラス方向に増加傾向にありその差の最大値は $0.3[N\cdot M]$ である。 T_y に関しては、 T_x と対称的なマイナス方向の増加だといえる。逆に、 T_z はピック量(Y)依存しなく一定であるといえる。図 2-133 は、同様に加工方向マイナス方向の Torque を示したが、 T_x においてはピック量(Y)値の増加によりマイナス方向に増加する傾向であり、 T_y 、 T_z に関してはピック量(Y)に関係せず一定であることがいえる。

以上の結果を表 2-14 に示す。

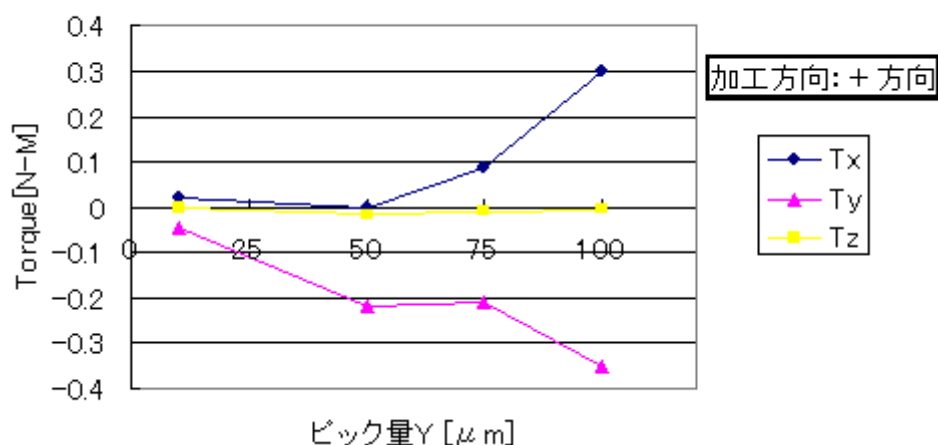


図 2-132 加工方向プラス方向における Torque

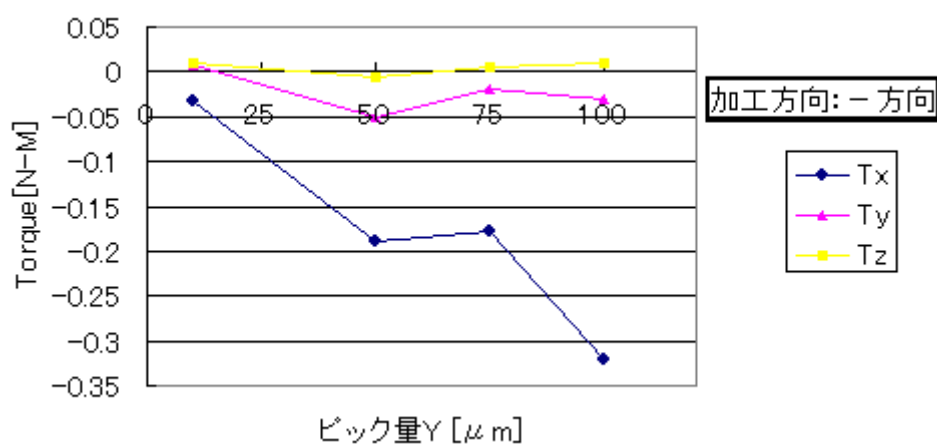


図 2-133 加工方向マイナス方向における Torque

表 2-14 加工方向と Force/Torque の向き

加工方向	要素	増減	最大差
＋方向	Fx	一定	0.02[N]
	Fy	一定	0.60[N]
	Fz	－増大	4.55[N]
－方向	Fx	一定	0.20[N]
	Fy	＋増大	1.25[N]
	Fz	－増大	1.73[N]
＋方向	Tx	＋増大	0.02[N-M]
	Ty	－増大	0.60[N-M]
	Tz	一定	4.55[N-M]
－方向	Tx	－増大	0.20[N-M]
	Ty	一定	1.25[N-M]
	Tz	一定	1.73[N-M]

(2)放電荒加工面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ に対して加工を施した実験結果

・顕微鏡写真による実験結果

顕微鏡写真は、図 2-134～図 2-140 に示したとおりで、放電荒加工面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ の場合においても、放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ の場合と同様に、ピック量 (Y) 値が $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下においては切り残しの部分が確認できず、 $50\text{ }\mu\text{m/Ry}$ が実用的だということがわかった。

一方、ピック量 (Y) 値が $50\text{ }\mu\text{m}$ より大きく設定した場合においては、放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ の場合と同様に、超高速回転ミーリングにおけるカッター筋との間に切り残しが確認できた。

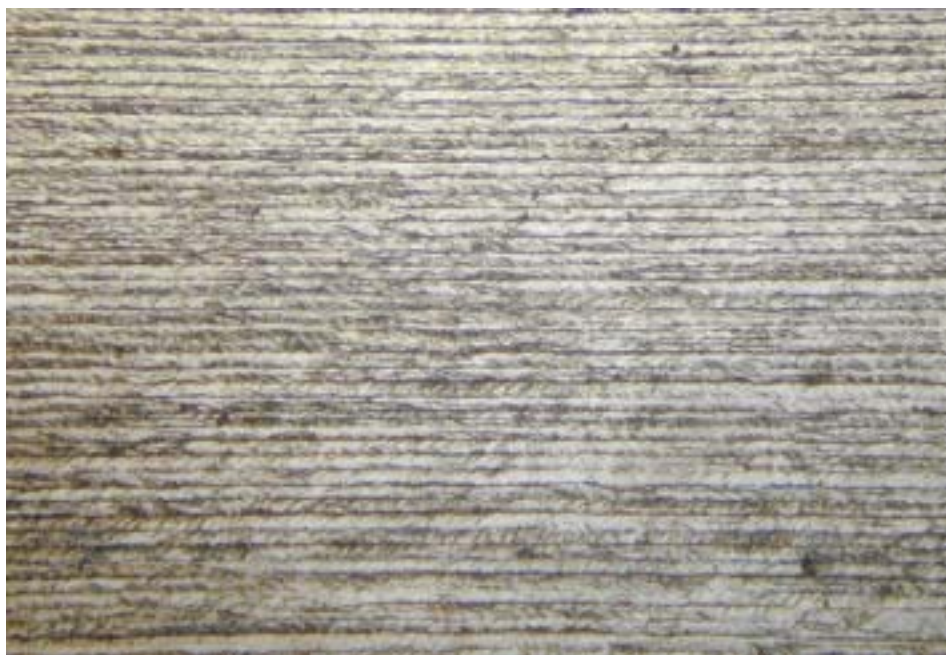


図 2-134 放電荒加工面 $25\text{ }\mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $10\text{ }\mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

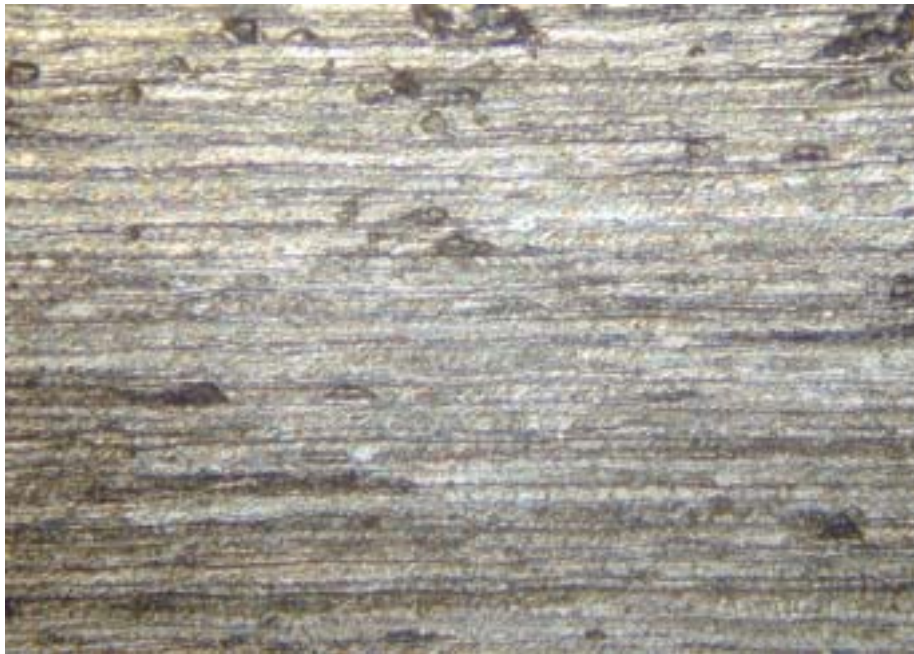


図 2-135 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $20\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

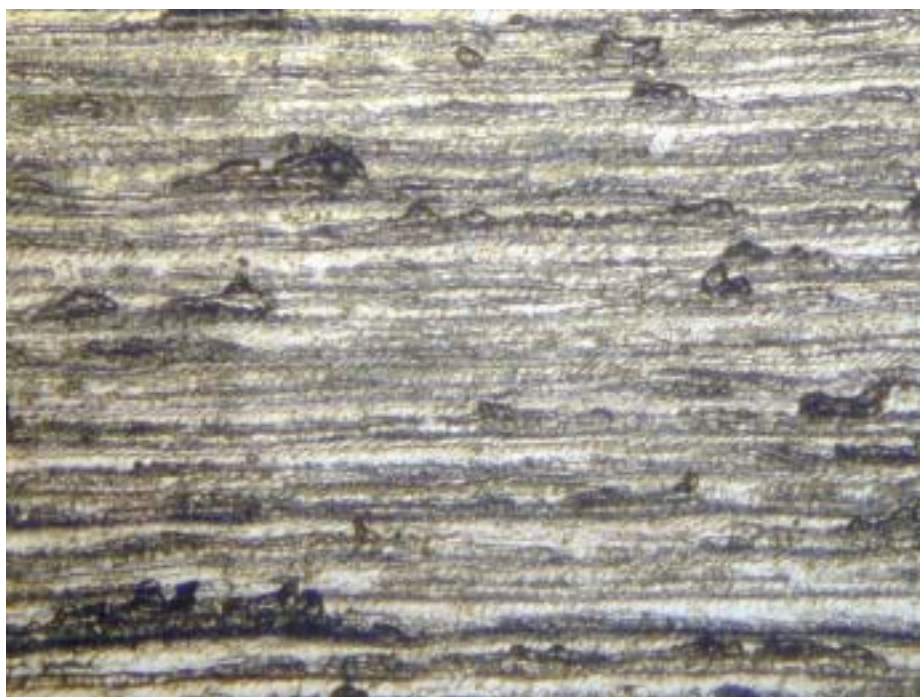


図 2-136 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $25\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

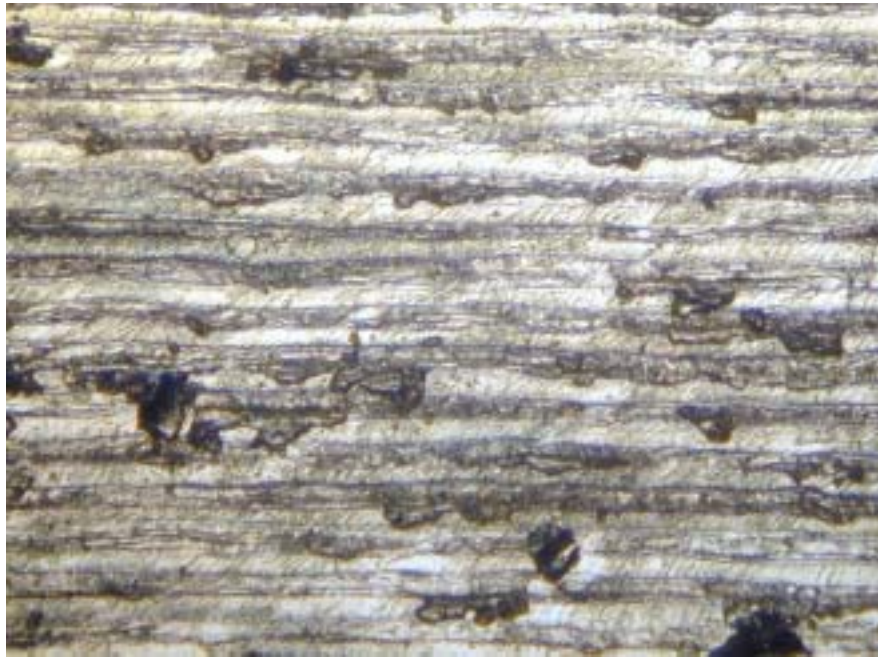


図 2-137 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $30\ \mu\text{m}$ 加工した
顕微鏡写真

($\times 100$)

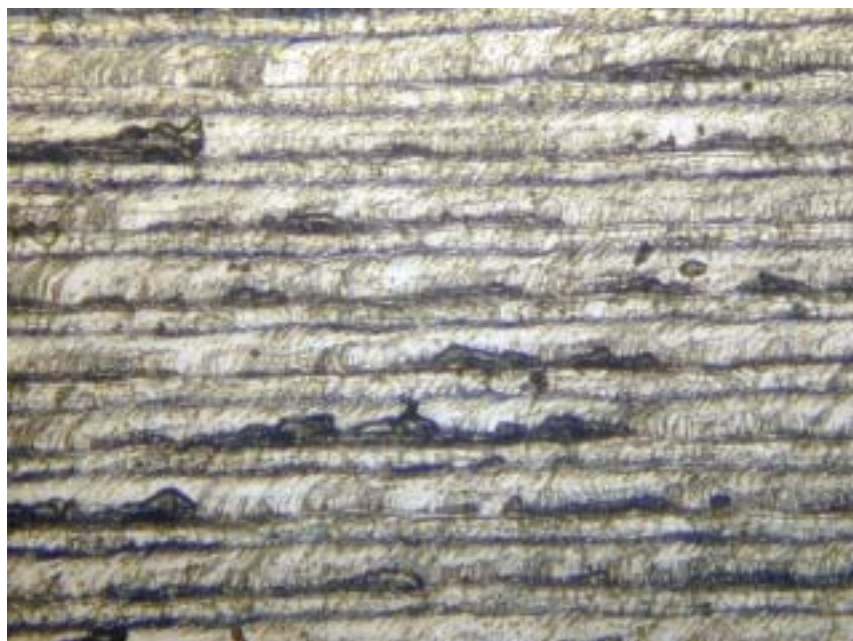


図 2-138 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $50\ \mu\text{m}$ 加工した
顕微鏡写真

($\times 100$)

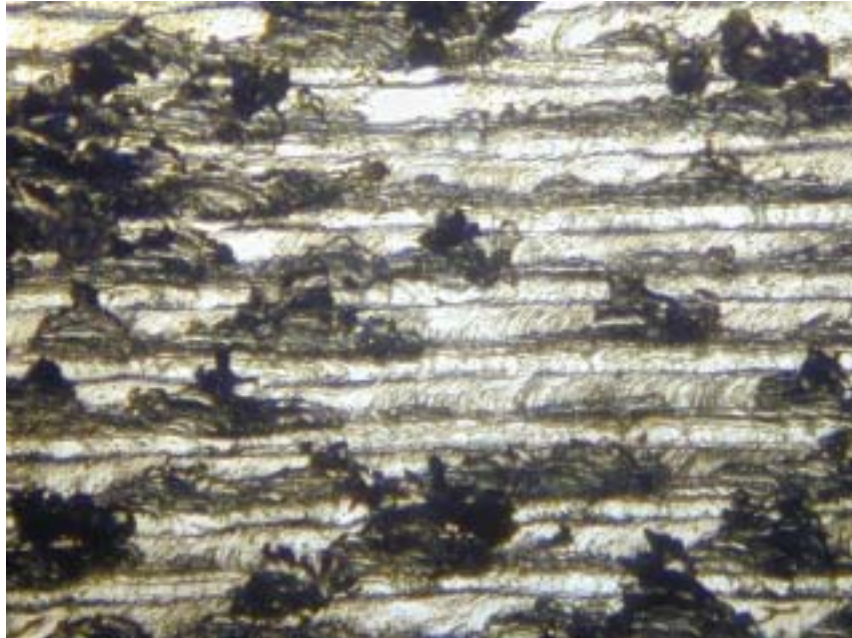


図 2-139 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $75\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真

($\times 100$)

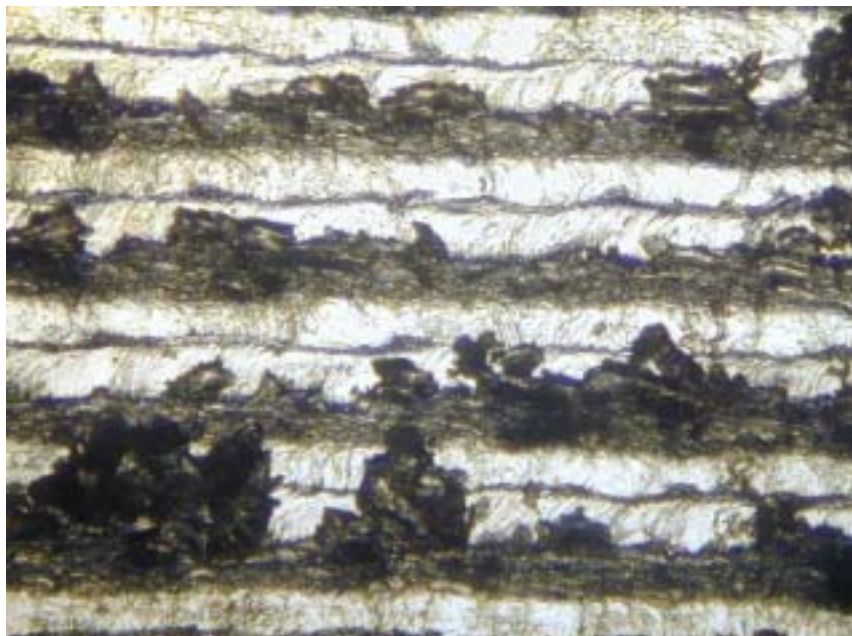


図 2-140 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m/Ry}$ を超高速回転ミーリングでピック量 $100\ \mu\text{m}$ 加工した顕微鏡写真($\times 100$)

・表面粗さの実験結果

次に、表面粗さは、図 2-141 に示したとおりであり、まず平行方向における表面粗さ Ry 値は、ピック量 (Y) 値が $50\mu\text{m}$ 以下では、ピック量の増加とともに表面粗さ Ry 値も、若干の増加がみられるが、その最大値と最小値の差は、 $1.04\mu\text{m}$ 程度であり、ピック量 (Y) 値が $50\mu\text{m}$ 以下においては、表面粗さはほぼ一定といえる。逆に、ピック量 (Y) 値が $50\mu\text{m}$ を超えると表面粗さ Ry 値が、 $6\mu\text{m}$ 程度まで増加することが分かった。垂直方向においても、放電荒加工面 $15\mu\text{m}/\text{Ry}$ の場合と同様の形状の結果が得られ、同様にピック量 (Y) 値が $50\mu\text{m}$ 以下では、ほぼ一定の表面粗さであるといえ、ピック量 (Y) 値が $50\mu\text{m}$ を超えると表面粗さはピック量 (Y) の増加とともに、急激に増加するものとなった。

このことにより、放電荒加工面 $25\mu\text{m}/\text{Ry}$ の場合においても、顕微鏡写真、及び、表面粗さの結果から一致したとおり、切り残しが発生しない最大のピック量 (Y) 値は、 $50\mu\text{m}$ であることがわかった。

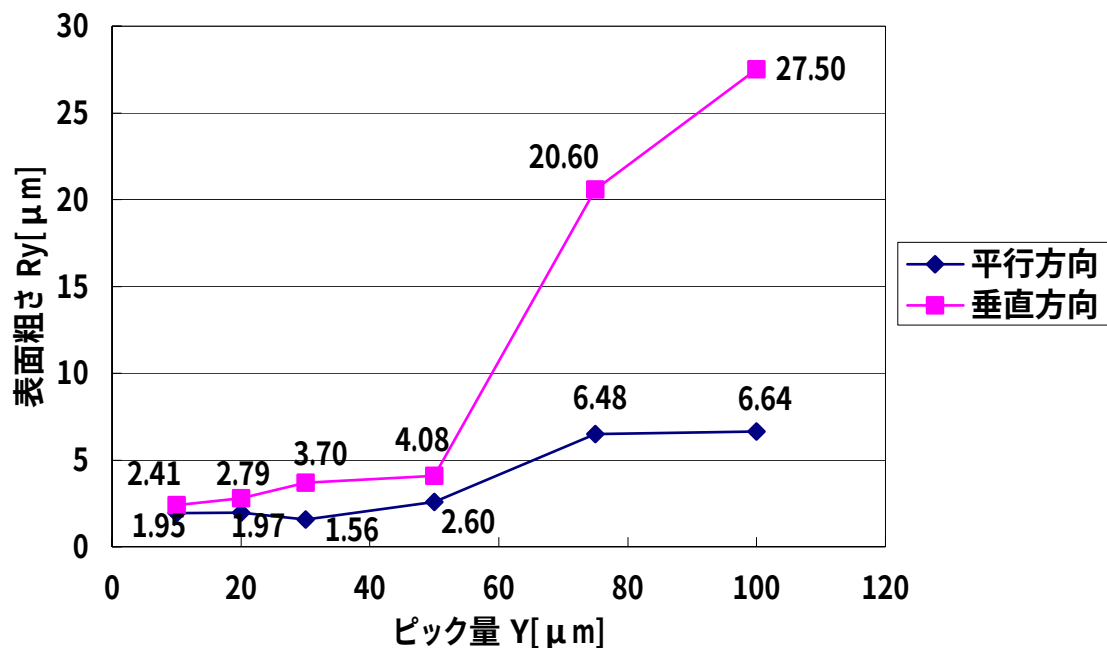


図 2-141 放電荒加工面 $25\mu\text{m}/\text{Ry}$ でのピック量変化の表面粗さ実験結果

- ・センサによる Force/Torque の測定結果

Force/Torque の測定結果を図 2-142～図 2-177 に示す。

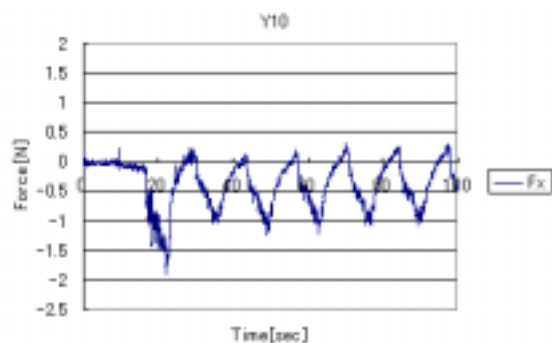


図 2-142 ピック量 Y10 μm におけるの Fx

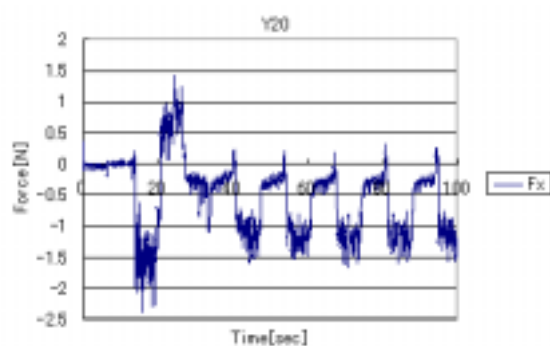


図 2-143 ピック量 Y20 μm におけるの Fx

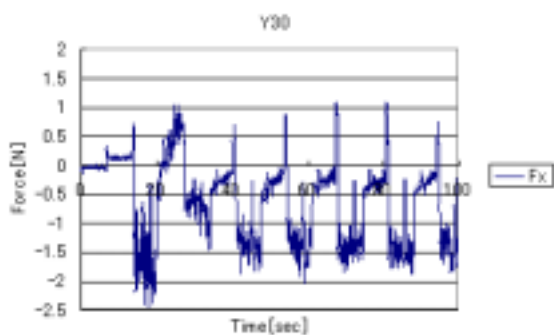


図 2-144 ピック量 Y30 μm におけるの Fx

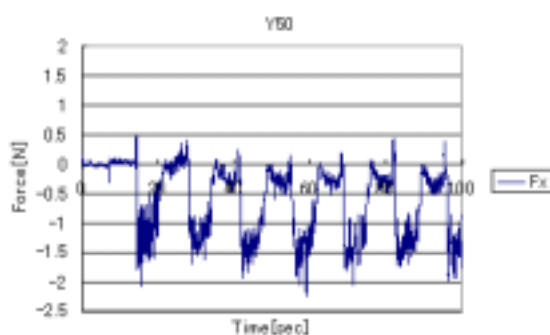


図 2-145 ピック量 Y50 μm におけるの Fx

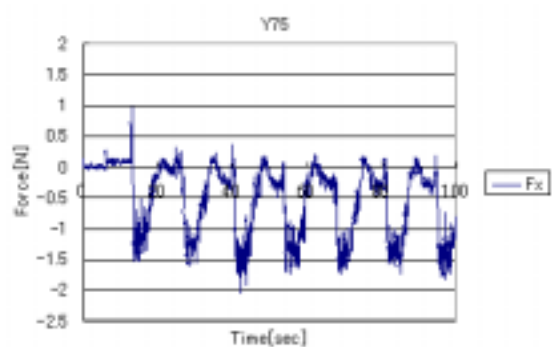


図 2-146 ピック量 Y75 μm におけるの Fx

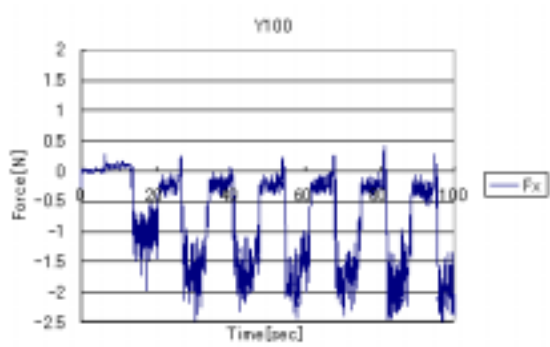


図 2-147 ピック量 Y100 μm におけるの Fx

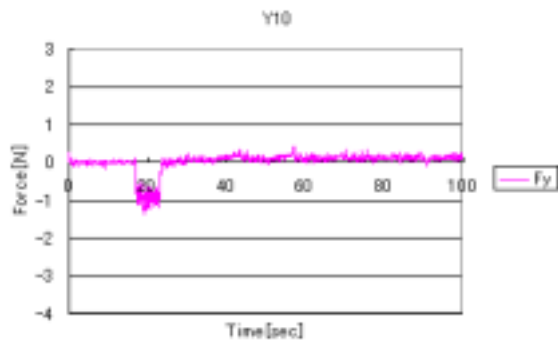


図 2-148 ピック量 Y10 μm におけるの F_y

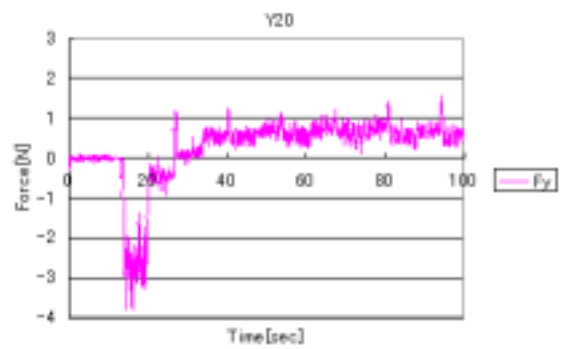


図 2-149 ピック量 Y20 μm におけるの F_y

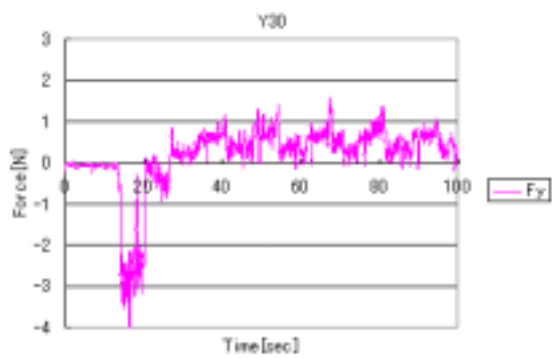


図 2-150 ピック量 Y30 μm におけるの F_y

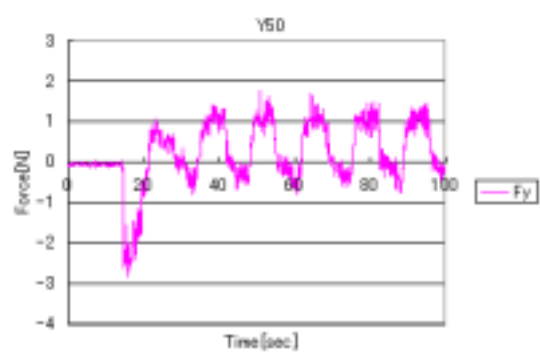


図 2-151 ピック量 Y50 μm におけるの F_y

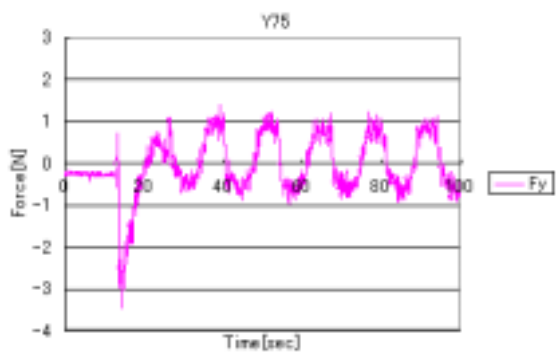


図 2-152 ピック量 Y75 μm におけるの F_y

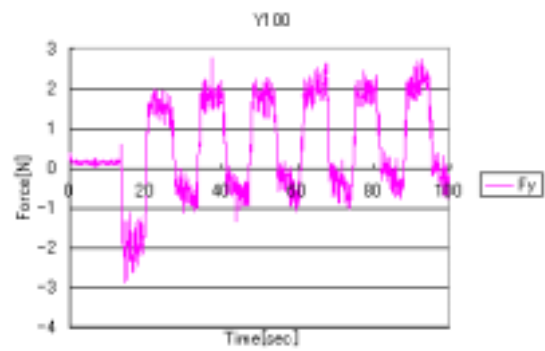


図 2-153 ピック量 Y100 μm におけるの F_y

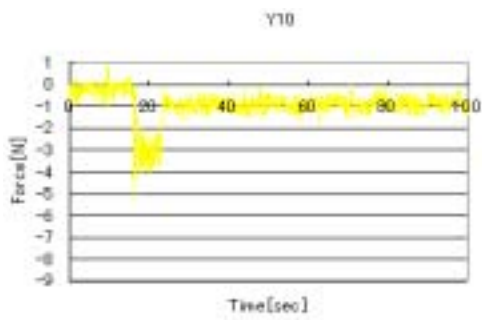


図 2-154 ピック量 Y10 μm におけるの F_z

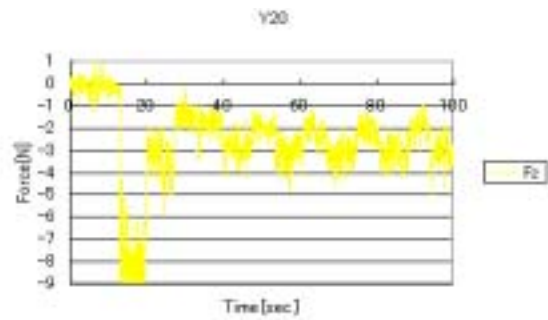


図 2-155 ピック量 Y20 μm におけるの F_z

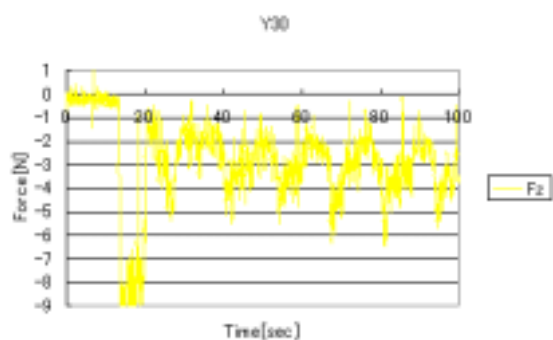


図 2-156 ピック量 Y30 μm におけるの Fz

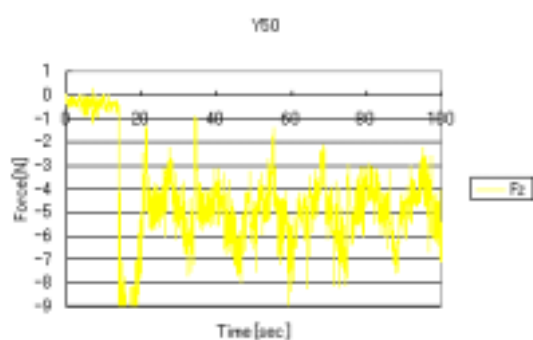


図 2-157 ピック量 Y50 μm におけるの Fz

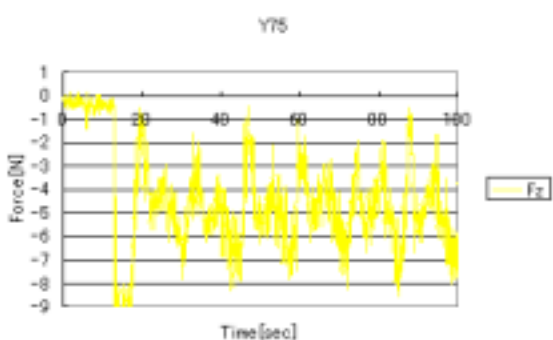


図 2-158 ピック量 Y75 μm におけるの Fz

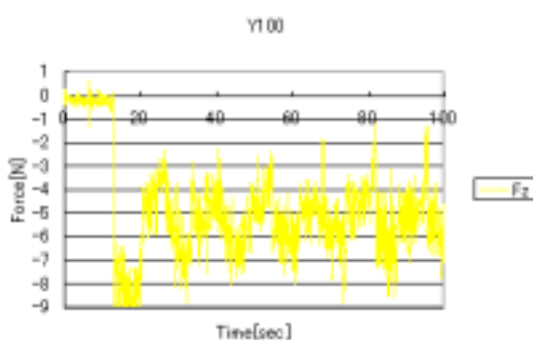


図 2-159 ピック量 Y100 μm におけるの Fz

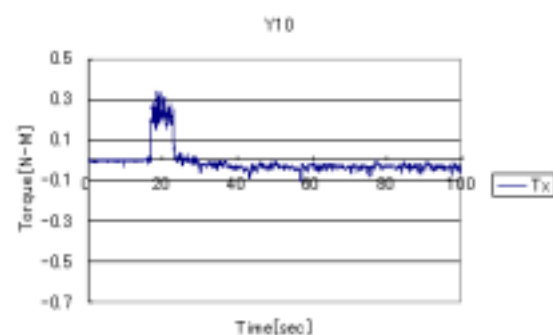


図 2-160 ピック量 Y10 μm におけるの Tx

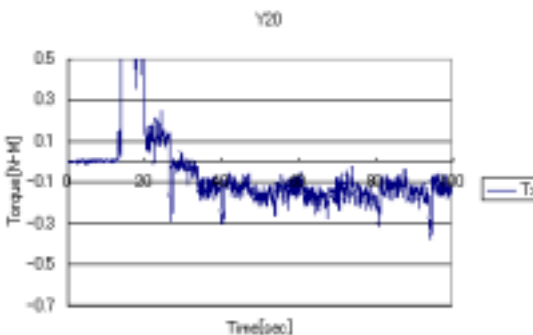


図 2-161 ピック量 Y20 μm におけるの Tx

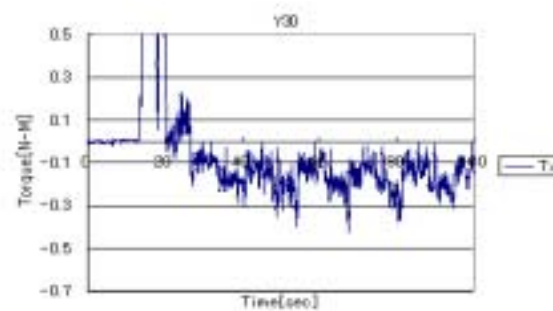


図 2-162 ピック量 Y30 μm におけるの Tx

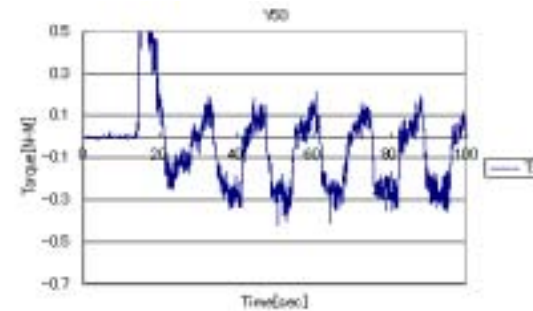


図 2-163 ピック量 Y50 μm におけるの Tx

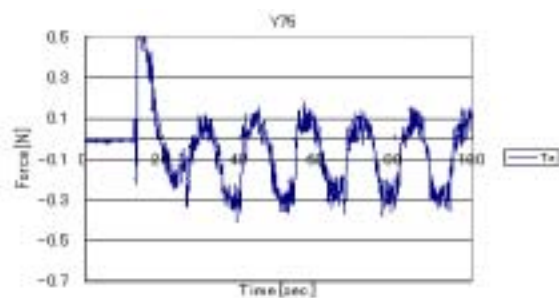


図 2-164 ピック量 Y75 μm におけるの Tx

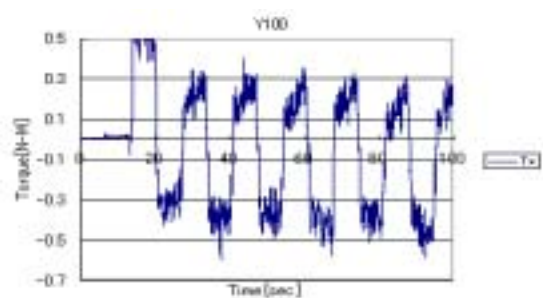


図 2-165 ピック量 Y100 μm におけるの Tx

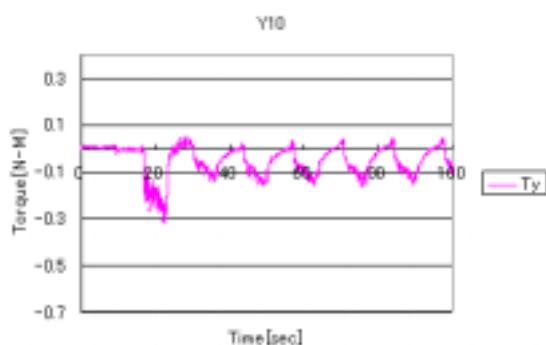


図 2-166 ピック量 Y10 μm におけるの Ty

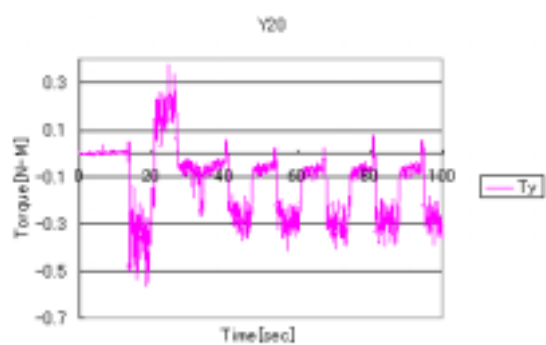


図 2-167 ピック量 Y20 μm におけるの Ty

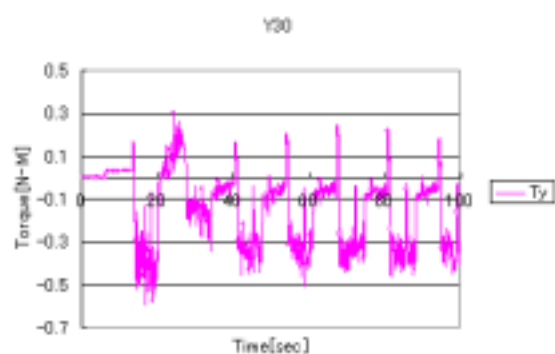


図 2-168 ピック量 Y30 μm におけるの Ty

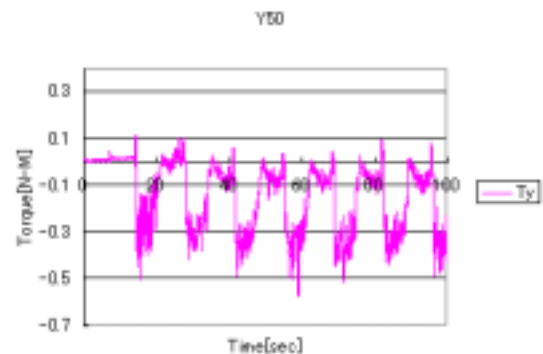


図 2-169 ピック量 Y50 μm におけるの Ty

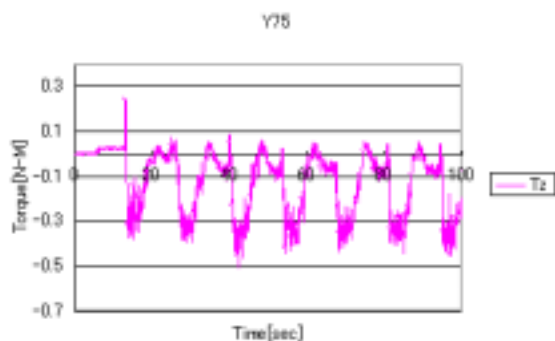


図 2-170 ピック量 Y75 μm におけるの Ty

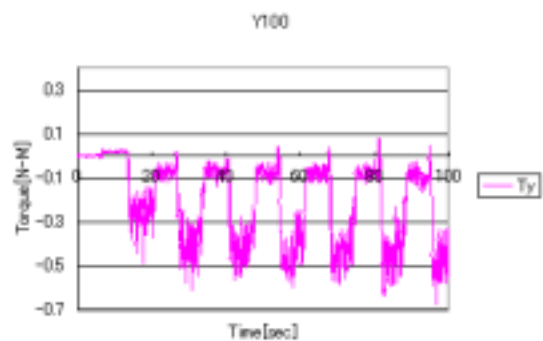


図 2-171 ピック量 Y100 μm におけるの Ty

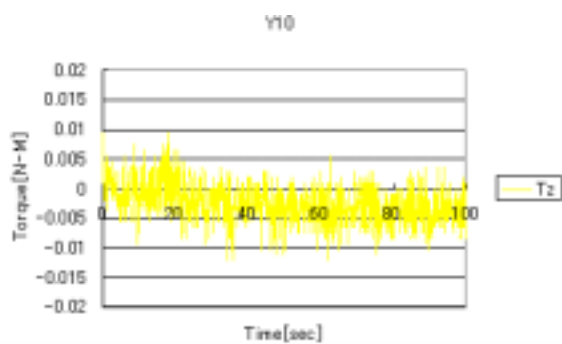


図 2-172 ピック量 Y10 μm におけるの T_z

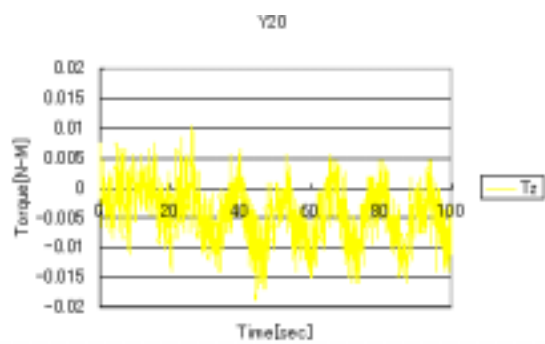


図 2-173 ピック量 Y20 μm におけるの T_z

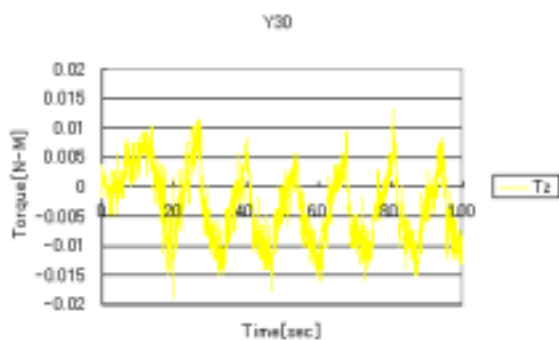


図 2-174 ピック量 Y30 μm におけるの T_z

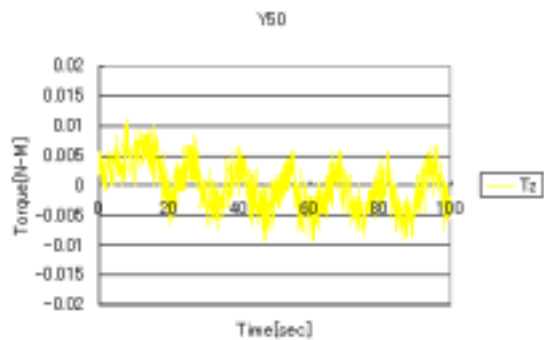


図 2-175 ピック量 Y50 μm におけるの T_z

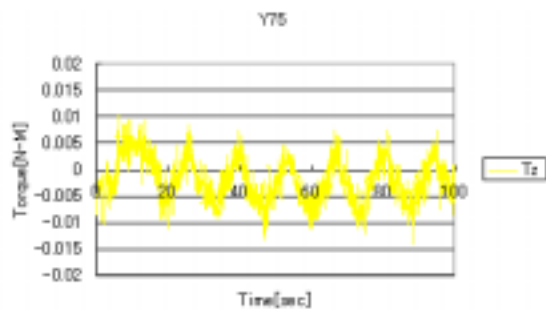


図 2-176 ピック量 Y75 μm におけるの T_z

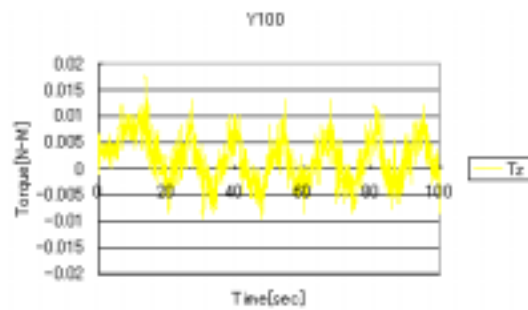


図 2-177 ピック量 Y100 μm におけるの T_z

・放電荒加工面 $25\ \mu\text{m}/\text{Ry}$ におけるの考察

次に、図 2-142～図 2-159 に示すグラフにおける加工方向別の Force をまとめたグラフを図 2-178 と図 2-179 に示す。ここで、図 2-178 には超高速回転ミーリングにおける加工方向プラス方向の測定結果をグラフである。グラフをみてわかるように F_x 及び F_y は、ほぼ一定であるといえ、ピック量(Y)の変化に対する Force の差の最大値においても $1[\text{N}]$ 前後である。また、 F_z においてはピック量(Y)の増加とともに Force は、マイナス方向に増加する傾向にあり、その差の最大値は $7.26[\text{N}]$ である。

次に図 2-142～図 2-159 に示すグラフにおける加工方向マイナスについての Force のグラフをまとめたものを図 2-179 に示す。図より、 F_x は一定であるといえピック量(Y)の変化に伴う Force の差の最大値においても $0.26[\text{N}]$ 程度でありごくわずかである。 F_y 及び F_z においては、それぞれプラス方向、マイナス方向に増加する結果となり、その Force の最大値の差はそれぞれ $2.44[\text{N}]$ と $1.90[\text{N}]$ である。また、両者のグラフは対称的な傾向だといえる。

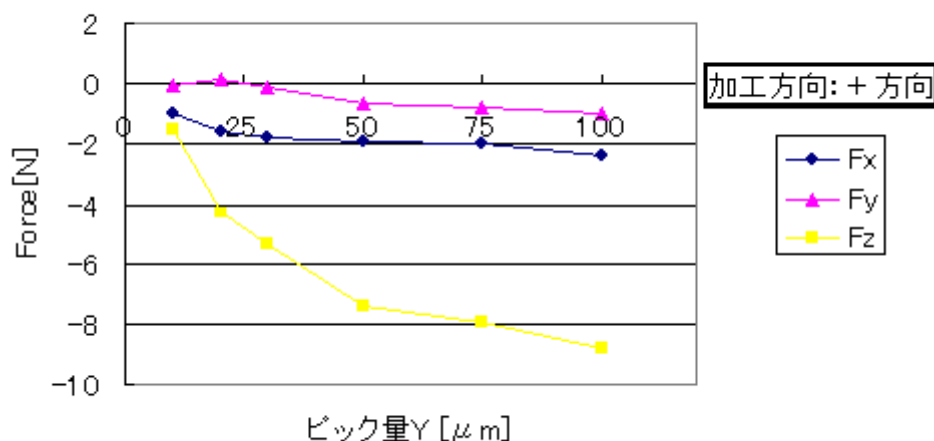


図 2-178 加工方向プラス方向における Force

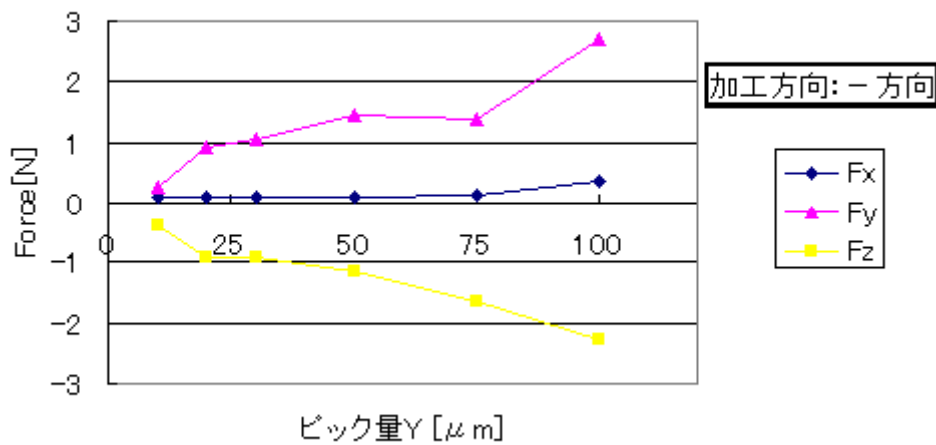


図 2-179 加工方向マイナス方向における Force

さらに、図 2-180 と図 2-181 に加工方向プラス方向における Torque の測定結果をまとめたものを示す。Tx 及び Ty においてもそれぞれプラス方向、マイナス方向に Torque が増加する傾向にあり、両者も対称的な傾向のグラフだといえる。Tx、Ty のピック量(Y)の変化に対する Torque の最大値の差は、それぞれ 0.37[N-M]、0.44[N-M]であった。Tz に関しては、ほぼ一定の結果が得られその差は、0.08[N-M]と微少である。図 2-181 の加工方向マイナス方向の Torque のグラフにおいては、ピック量(Y)の増加とともに Tx のみマイナス方向に増加し、その差の最大値は 0.51[N-M]である。Ty と Tz に関しては、その差は 0.05[N-M]と 0.01[N-M]とごくわずかであり、ピック量に依存しないということがいえる。

以上の Force/Torque の結果を表 2-15 に示す。

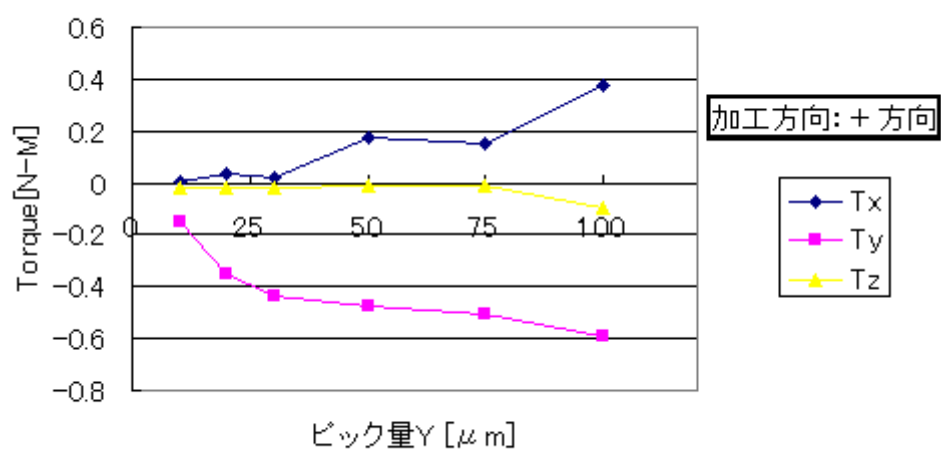


図 2-180 加工方向プラス方向における Torque

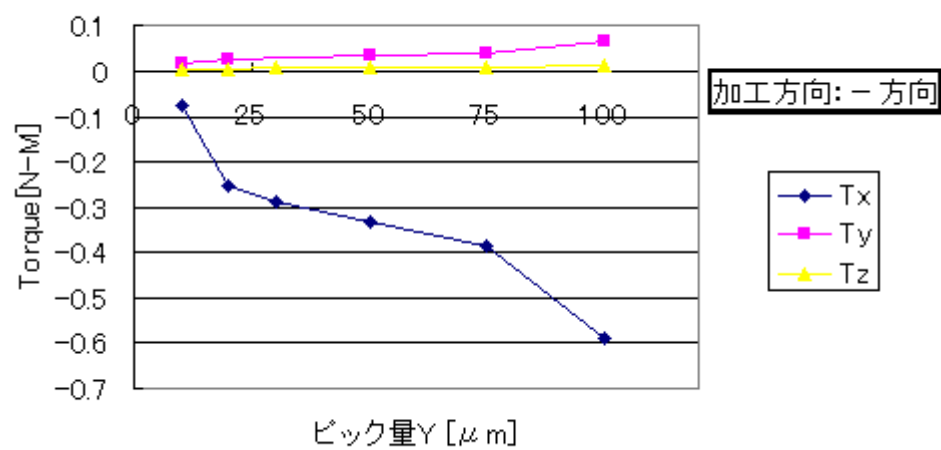


図 2-181 加工方向マイナス方向における Torque

表 2-15 加工方向と Force/Torque の向き

加工方向	要素	増減	最大差
＋方向	Fx	一定	0.90[N]
	Fy	一定	1.42[N]
	Fz	－増大	7.26[N]
－方向	Fx	一定	0.26[N]
	Fy	＋増大	2.44[N]
	Fz	－増大	1.88[N]
＋方向	Tx	＋増大	0.37[N-M]
	Ty	－増大	0.44[N-M]
	Tz	一定	0.08[N-M]
－方向	Tx	－増大	0.51[N-M]
	Ty	一定	0.05[N-M]
	Tz	一定	0.01[N-M]

2.4.4 結言

以上の実験結果より放電荒加工面 $15\mu\text{m/Ry}$ と $25\mu\text{m/Ry}$ それぞれにピック量 (Y) 値を変化させ超高速回転ミーリングを施した場合、同様の結果を得ることが出来、お互いに最大ピック量 (Y) の値が明確となった。どちらの放電荒加工面においても、最大ピック量 (Y) 値は、 $50\mu\text{m}$ という結果が得られ、それ以下のピック量においては、ほぼ同程度の表面精度が得られるが、当然、超高速回転ミーリングにおける加工時間は、低下してしまうことになる。逆に、ピック量 (Y) 値が $50\mu\text{m}$ 以上であると、ピック量の増加による取り残しが、超高速回転ミーリングのカッター筋の間に発生し、表面粗さにも大きく影響を与え表面精度を低下させてしまう要因となった。

このピック量 (Y) とカッター筋の間に発生する取り残しとの関係の原理図を図 2-182 に示した。

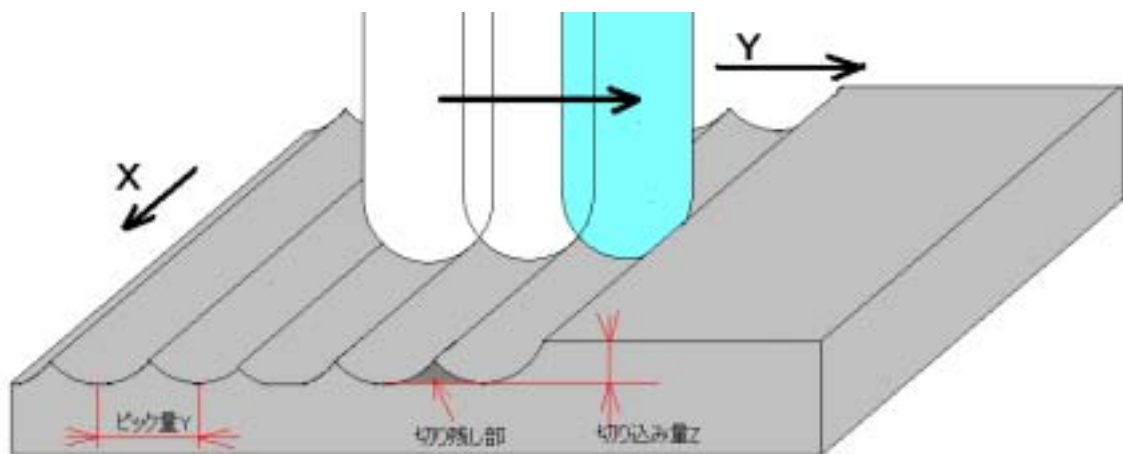


図 2-182 ピック量 (Y) 値と切り残しの関係図

図を見てわかるように、本実験においては、ボールエンドミルを使用したため、ピック量 (Y) 値の増加にともない、ボールエンドミルの移動量の間に切り残し部分が発生してしまう。本実験においては、放電荒加工面 $15\mu\text{m/Ry}$ と $25\mu\text{m/Ry}$ の双方の実験においてもピック量 (Y) 値は、 $50\mu\text{m}$ を超えてしまうと切り残し部が発生し、削りきれないごく微細な部分がめくりあがっている状態となっていることが顕微鏡写真より予想される。顕微鏡を詳しく観察すると切り残し部の発生については X マイナス方向の加工を行った際に発生していることがわかる。これより切り残し部を低減させ、更なる表面精度向上を目指す方法として以下の加工法が有効的であると思われる。

1. 一度加工した後に加工方向を 90 度回転させてもう一度加工を行う。
2. 加工方向を X+方向のみとする⁸⁾。

次に、図 2-183 にピック量 (Y) と切り残し高さ (H) との関係を図示した。ピック量 (Y) の増加とともに切り残し部が増大し、同時に切り残し高さ (H) も増加する。その関係を MS20 を用いて計算し、ピック量 (Y) と切り残し高さ (H) との関係を図 2-184 に示す。

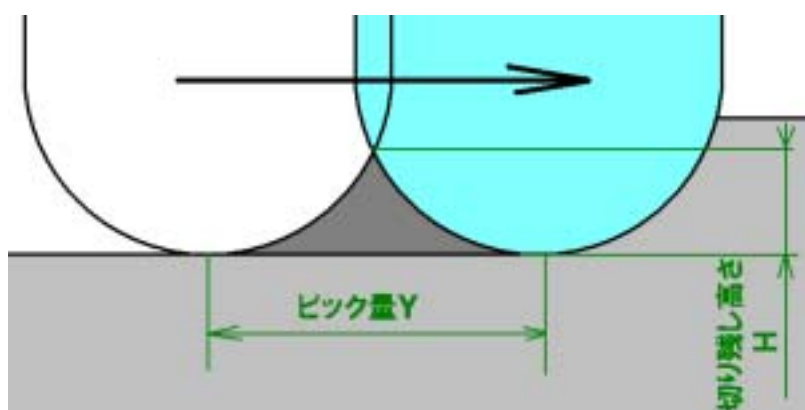


図 2-183 ピック量(Y)と切り残し量(H)の関係図

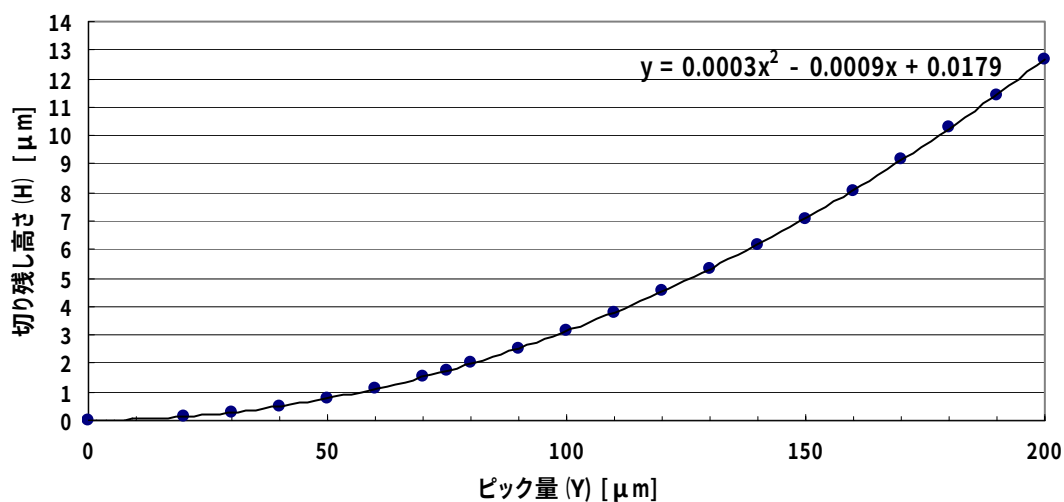


図 2-184 ピック量(Y)に対する切り残し高さ(H)の理論値

図 2-184 に示したとおり、ピック量(Y)の増加とともに、切り残し高さ(H)は二次曲線的に増加することがわかる。これにより、実験結果の表面粗さグラフの垂直方向のグラフと同じような増加がみられ、このことから垂直方向の表面粗さ Ry 値の増加は、切り残し高さ(H)に依存するものと考えられる。また、実験結果の表面粗さはピック量(Y)値が 50 μm 以下の場合においては、表面粗さ Ry 値は、ほぼ一定となったが図 2-184 をみてわかるようにピック量(Y)が 50 μm 以下での、切り残し高さ(H)は 1 μm 以下であり、切り残し高さ(H)が 1 μm 以下では、表面粗さに変化がでないことがわかる。

つまり、放電荒加工面 15 $\mu\text{m/Ry}$ 及び 25 $\mu\text{m/Ry}$ において、双方とも最大ピック量(Y)は、50 μm という結果が得られ、その場合の切り残し高さ(H)がおおよそ 1 μm 以下であるということが理論値より判明した。

Force/torque についても放電加工表面粗さ 15 $\mu\text{m/Ry}$ と 25 $\mu\text{m/Ry}$ とで同様の結果を得ることができた。表 2-16 と表 2-17 にその関係を示す。

表 2-16 と表 2-17 の結果より Force/Torque の関係は、放電加工表面粗さ 15 $\mu\text{m/Ry}$ の方がすべての点において小さいことが伺える。これは放電加工表面粗さ 25 $\mu\text{m/Ry}$ の切り込み量 Z が 40 μm であるのに対して、放電荒加工面 15 $\mu\text{m/Ry}$ の切り込み量が 25 μm と小さいためであるものと推測することができる。したがって、放電荒加工後に切削仕上げ加工を施す際には放電荒加工面 15 $\mu\text{m/Ry}$ から切削を行うほうが軸に対する負荷は小さいものであることが考察される。

表 2-16 放電荒加工面 25 $\mu\text{m/Ry}$ と 15 $\mu\text{m/R}$ における
加工方向と Force の向きの比較

加工方向	要素	増減 及び 方向	15 $\mu\text{m/Ry}$ 最大差[N]	25 $\mu\text{m/Ry}$ 最大差[N]	15 $\mu\text{m/Ry}$ と 25 $\mu\text{m/Ry}$ の 差[N-m]
+方向	Fx	一定	0.02	0.9	0.88
	Fy	一定	0.6	1.42	0.82
	Fz	増大 -	4.55	7.26	2.71
-方向	Fx	一定	0.2	0.26	0.06
	Fy	増大 +	1.25	2.44	1.19
	Fz	増大 -	1.73	1.88	0.15

表 2-17 放電荒加工面 25 $\mu\text{m/Ry}$ と 15 $\mu\text{m/R}$ における加工方向と Torque の向きの比較

加工方向	要素	増 減 及 び 方向	15 $\mu\text{m/Ry}$ 最大差 [N-m]	25 $\mu\text{m/Ry}$ 最大差 [N-m]	15 $\mu\text{m/Ry}$ と 25 $\mu\text{m/Ry}$ の 差[N-m]
+方向	Tx	増大 +	0.278	0.37	0.092
	Ty	増大 -	0.301	0.44	0.139
	Tz	一定	0.005	0.08	0.075
-方向	Tx	増大 -	0.29	0.51	0.22
	Ty	一定	0.05	0.05	0
	Tz	一定	0.004	0.01	0.006

2.5 加工パターンの変化と表面粗さについて

2.5.1 実験概要

実際の 3-D 形状の加工は走査線加工や等高線加工を用いて製作することが多い。前実験では単一方向の加工を行ったが、本実験では単一方向に加工した後に加工方向を 90 度変化させてもう一度加工を行う。また、それに伴う表面粗さを双方比較し、次節で行う 3-D 形状加工に対する最適な加工パターンを模索する。

2.5.2 実験方法

加工方法としては図 2-185 に示すように十字方向に切削を行う。加工条件は表 2-18 に示す条件を用いる。放電荒加工面 $15\mu\text{m/Ry}$ と $25\mu\text{m/Ry}$ の双方において加工を行い、表面粗さを測定し、表面顕微鏡写真を撮影する。

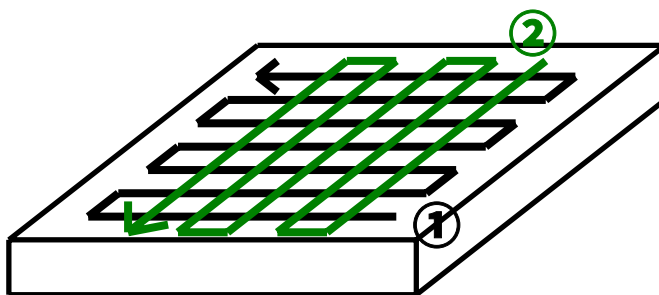


図 2-185 十字方向加工パターン図

表 2-18 加工条件

	放電荒加工面 $15\mu\text{m/Ry}$	放電荒加工面 $25\mu\text{m/Ry}$
非加工物	SK5	SK5
電極材料	Cu	Cu
送り[mm/min]	100	100
主軸回転数[rpm]	40000	40000
ピック量 $Y[\mu\text{m}]$	50	50
切り込み量 $Z[\mu\text{m}]$	25	40
ボールエンドミル直径[mm]	0.8	0.8
加工液液面高さ[mm]	20	20
走査線角度[度]	0,90	0,90

2.5.3 実験結果

以下に加工面の表面顕微鏡写真を示す。

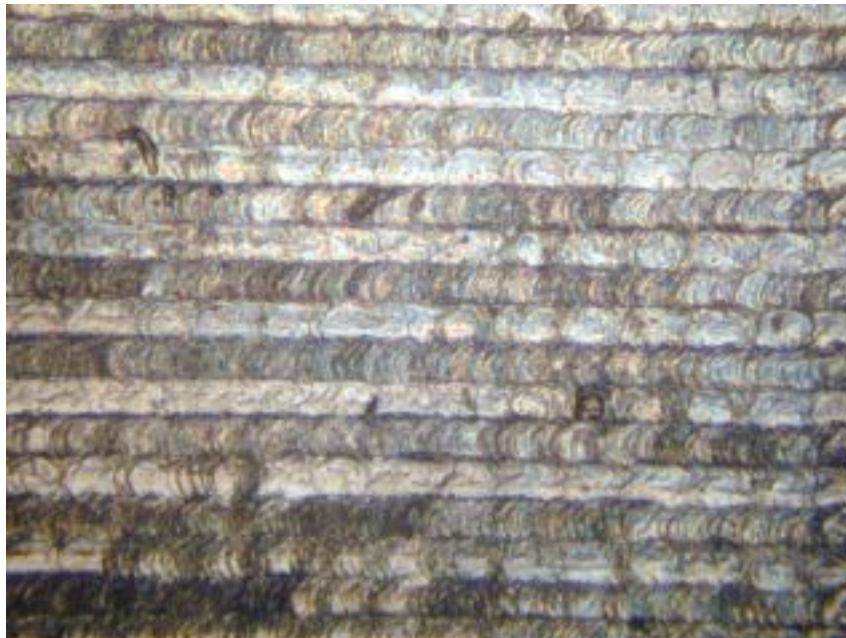


図 2-186 放電荒加工面 $15 \mu\text{m/Ry}$ における十字方向超高速回転ミーリングの顕微鏡写真
($\times 100$)

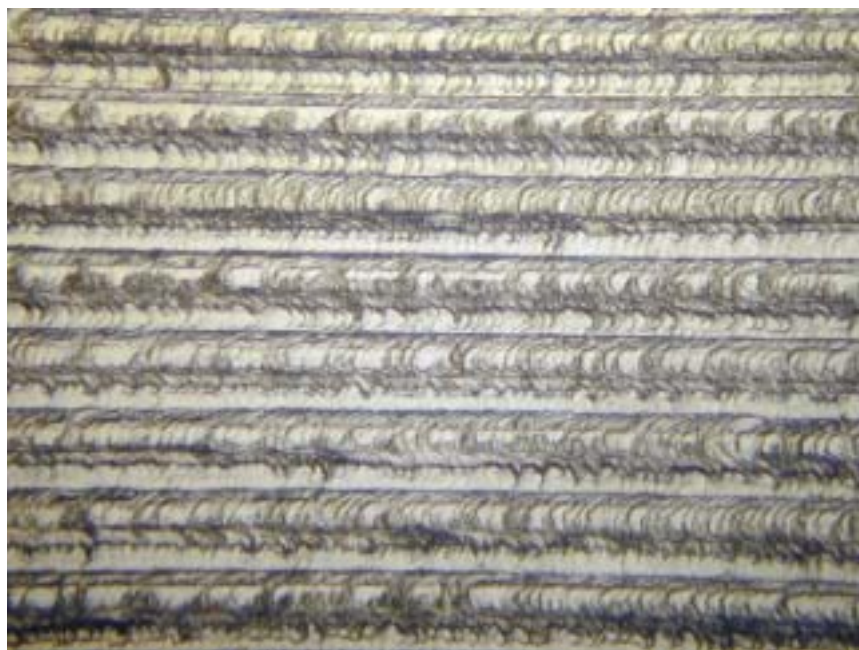


図 2-187 放電荒加工面 $25 \mu\text{m/Ry}$ における十字方向超高速回転ミーリングの顕微鏡写真
($\times 100$)

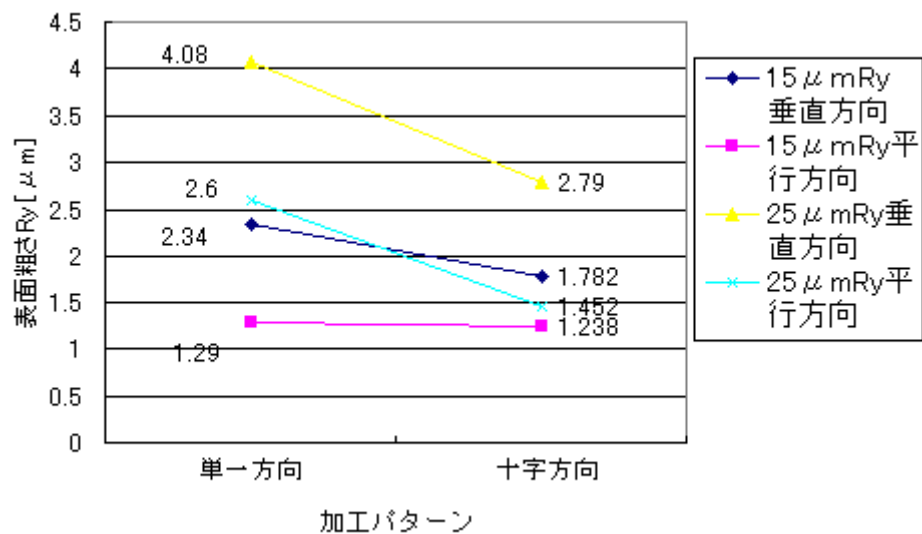


図 2-188 加工パターンの違いによる表面粗さの比較

2.5.4 結言

図 2-186 と図 2-187 に示す加工後の表面顕微鏡写真を見る限り、単一方向加工である前実験の表面顕微鏡写真と比べて、一度単一方向に走査線加工した時と更に 90 度反転させて走査線加工を施した場合とでは、明らかに後者のほうが表面粗さが優れていることが判明した。ここで、図 2-188 よりその表面粗さの値は垂直方向でおよそ 2 分の 1 になっている。これは、単一方向で加工した際に発生するカッター筋間の切り残し部が 90 度反転し再び加工することによって除去されるためであると思われる。したがって、3 次元形状加工をする際にも十字方向に走査線加工したほうがよりよい表面精度の製品を得られるという結果になる。

2.6 3次元形状による実験

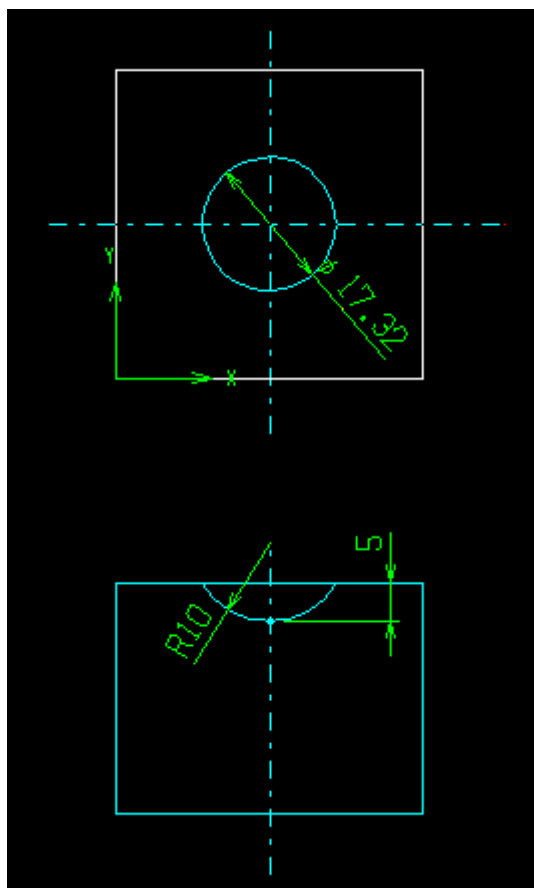
2.6.1 実験概要

本実験は金型における高速・高精度仕上げ加工を目的としており、論文中の 3～5 節において実用化に向けた加工条件の探索を行ってきた。そこで本節では、前実験で求められた条件を用い、実際の金型を製作することを念頭に置いて 3-D 形状の仕上げ加工を行った。また、放電加工のみで仕上げ加工まで行った場合と、荒加工を放電加工機において行い、仕上げ加工をミーリングを用いて行った場合との所要時間を検討して、複合加工法の実用性を検討する。

2.6.2 実験方法

本実験では、図 2-189 に示すような半球状の形状を加工する。加工手順は、まず CNC 旋盤（図 2-190）を用いて加工電極を設計・製作する。電極製作に用いたプログラムを次頁に示す。製作した電極が図 2-191 である。図中では電極形状はボタン形状となっているが、設計の都合上実際に加工に用いるのは電極の先端部だけである。次に製作した電極を用いて放電加工を行う。加工は荒仕上げ加工のみとし、放電加工表面 $15\mu\text{m}/R_y$ に加工する。加工終了後、放電加工機の軸交換を行い MS20（図 2-192）にて製作した NC データを用いて切削加工にて仕上げ加工を行う。加工は第 5 章で述べたように十字方向に行うものとする。この時ワークとエンドミル間を絶縁しておく必要がある。

また一方で、放電加工のみで仕上げ加工まで行い、放電加工表面 $1\mu\text{m}/R_y$ に仕上げる。実験に関しては全ての加工時間を記録しておく。



2-189 加工形状図

・電極加工に用いた NC プログラム

VTLIN[1]=1	N0107 G01 X0 Z1	F0.18
VTLFN[1]=1	N0108 X41	N0210 X0 F0.12
VTLL[1]=40	N0109 Z-21.95	N0211 G03 X19.874
VTLA2[1]=5	N0110 G81	Z-9.104 K-9.975
VTLA1[1]=80	N0111 G00 X0 Z2.2	N0212 G02 X21.692
VTLIN[3]=7	G42	Z-10.013 I0.996 K0.087
VTLFN[3]=1	N0112 G01 Z0.2 E0.12	N0213 G03 X39.9
VTLL[3]=40	N0113 G03 X20.347	Z-19.95 I-0.871 K-9.937
VTLA2[3]=3	Z-9.777 K-10.175 E0.18	N0214 G01 Z-21.95
VTLA1[3]=60	N0114 X40.3 Z-19.95	F0.18
VWKR=9999.999	I-0.199 K-10.173 E0.12	N0215 X41.8
VCHKL=0 VCHKD=0	N0115 G01 Z-21.75	N0216 G40
VCHKX=38.7	N0116 X43.4 E0.18	N0217 G80
VCHKZ=-122.5	N0117 G40	N0218 G01 X42
DEF WORK	N0118 G80	Z-20.85
PT	N0119 G00 X49	N0219 G00 X49
LF,LC,[-129,0],[41,41],[1	N0120 G97 S611 M09	N0220 G97 S1500 M05
30,0]	N0121 Z5	M09
END	N0122 X500	N0221 Z5
CLEAR	N0123 X500 Z800	N0222 X500
DRAW	T0100	N0223 X500 Z800
N0001 G00 X500 Z800	NAT03	T0300
N0002 G50 S1500	N0200 G97 S1500 M42	N0224 M02
NAT01	M08	
N0100 G97 S611 M41	N0201 G00 Z5	
M03 M08	T030303	
N0101 G00 Z5	N0202 X49	
T010101	N0203 Z2	
N0102 X49	N0204 X4	
N0103 Z6.2	N0205 G96 S800	
N0104 G96 S94	N0206 G87 N0207	
N0105 G85 N0106 D1	N0207 G81	
F0.12 M85	N0208 G00 X-0.8	
N0106 G83	N0209 G01 Z0 G42	



図 2-190 CNC 旋盤



図 2-191 半球状銅電極

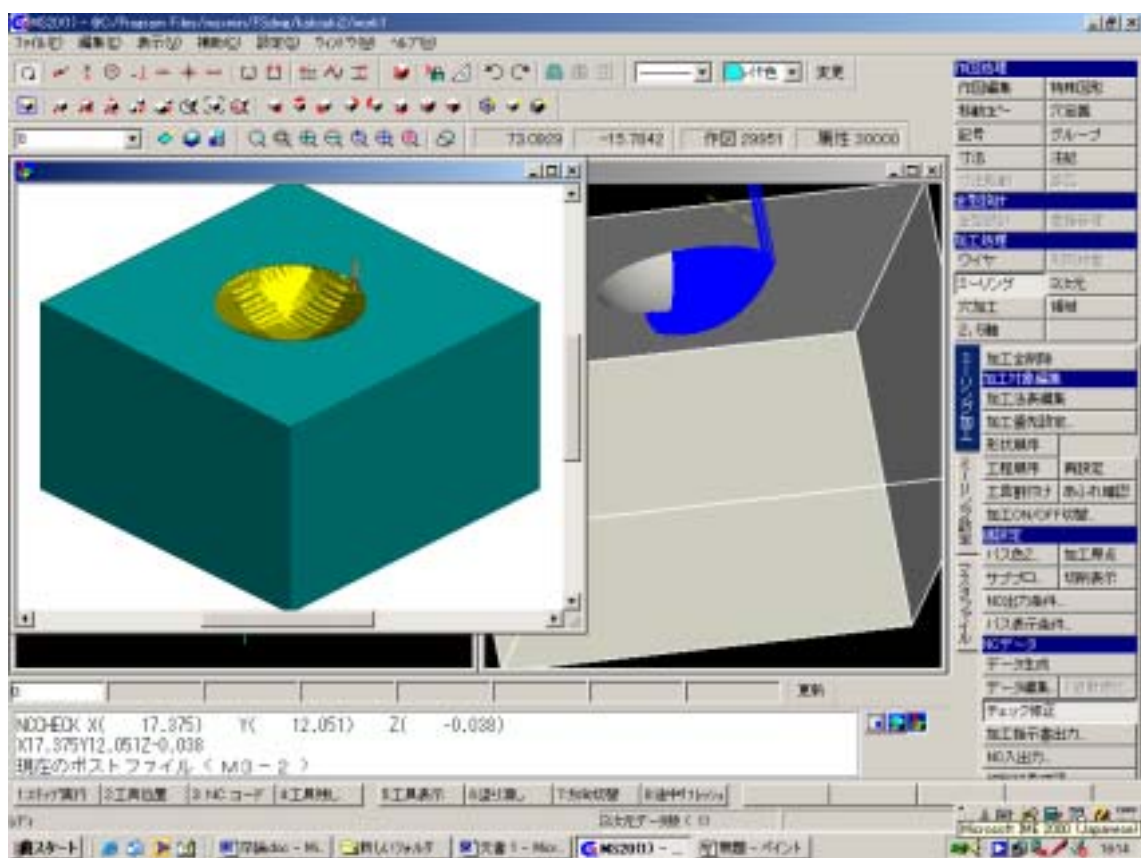


図 2-192 MS20 を用いた加工シュミレーション図

表 2-19 加工条件表

・加工条件詳細

表 2-19 は今回の仕上げ切削加工に用いた加工条件である。これは MS20 にて NC プログラムを製作する際に指定した加工条件であり、表中の加工段階 1、2 は走査線仕上げの水平方向への加工と垂直方向への加工の十字パターン加工を表している。工具は 2 枚刃超鋼エンドミルの直径が 0.8mm のものを用い、加工を行う範囲をワーク上面である Z0 に、下限をワーク下面に指定した。NC を製作する際の起動補正を工具半径とし、第 1 段階の加工では 0°、第 2 段階の加工では 90° の角度で走査線を走らせることとした。仕上げ代に関しては今回の加工では、第 2 段階目に目標寸法となる 0mm に設定し、第 2 段階も 0mm とした。ピック量は第 3 節で最大ピック量とされる 50μm に指定して、目標加工形状に対する NC の依存度であるトレランス量を 0.01 に指定し、より高精度な加工を目標にした。送り速度は 100mm/min に指定し、主軸回転数を 40000rpm とした。切削方向は往復加工で行い、加工安全を 3mm 取ることにした。加工のアプローチは Z 方向について行い、加工に対する安全代を 10mm 取ることにした。

以上の加工条件より NC プログラムを製作して加工を行った。

	加工段階 1	加工段階 2
曲面加工タイプ	走査線仕上	走査線仕上
工程区分	1	2
工具名	BES0.8	BES0.8
型	BEM	BEM
型詳細	超鋼	超鋼
工具径	0.8mm	0.8mm
加工範囲上限	Z0	Z0
加工範囲下限	Z1	Z1
加工領域補正	工具半径	工具半径
加工領域補正量	0.4mm	0.4mm
角度指定	なし	なし
走査線角度	0	90
経路除去	なし	なし
除去面エッジ除去	なし	なし
仕上げ代 Cr	0mm	0mm
Pr/Pz 指定方法	PrPz	PrPz
ピック量 Pr	0.05mm	0.05mm
形状トレランス量	0.01	0.01
直線トレランス量	0.01	0.01
送り速度 Fr	100mm/h	100mm/h
送り進入脱出 Fz	100mm/h	100mm/h
主軸回転数 S	40000rpm	40000rpm
ピックモード	往復	往復
切削モード	UP	UP
復帰モード	I(G1)	I(G1)
加工面安全代	3mm	3mm
アプローチモード	Z	Z
アプローチ量 Z	10mm	10mm
エスケープモード	Z	Z
エスケープ量 Z	10mm	10mm

2.6.3 実験結果

放電加工によって表面粗さ $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ に加工したものが図 2-193 である。図 2-194 は放電加工後に MS20 で製作したプログラムで 3 次元における超高速回転ミーリング加工したものである。図 2-195 は放電加工のみで仕上げ加工まで行った写真である。



図 2-193 放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ の表面写真

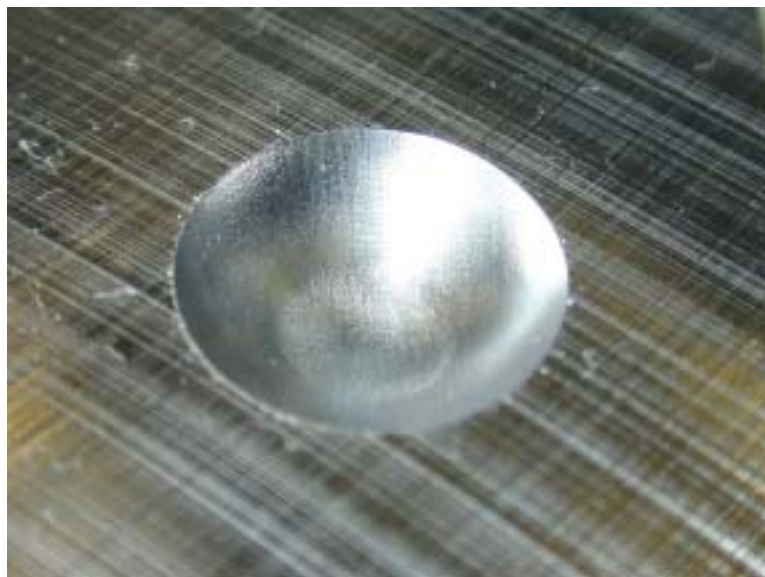


図 2-194 放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ より複合加工を施した表面写真

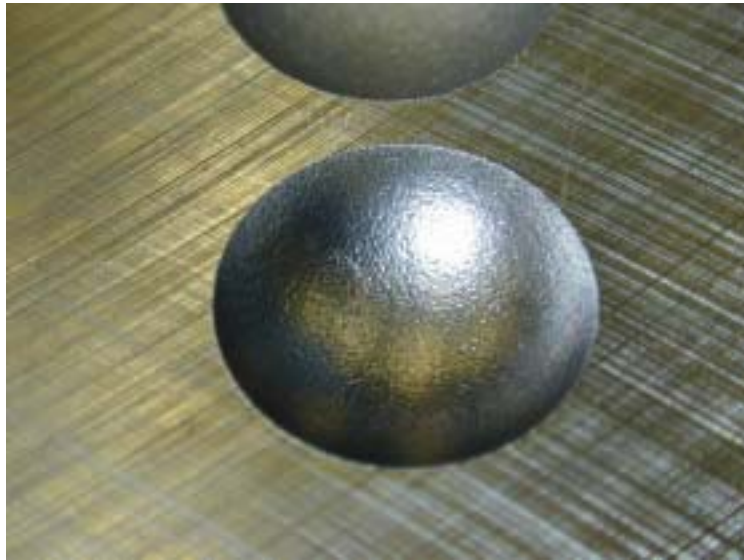


図 2-195 放電加工面 $1\mu\text{m/Ry}$ の表面写真

表 2-20 加工時間の比較表

	複合加工	放電加工のみ
放電加工	26 分 25 秒	6 時間 38 分 36 秒
切削加工	27 分 59 秒×2	—
全加工時間	1 時間 22 分 23 秒	6 時間 38 分 36 秒

2.6.4 結言

3-D 形状を加工する際の加工時間を表 2-20 に示した。これより同条件のものを加工する際に、放電荒加工後に仕上げ切削加工を行うことにより、加工時間を 5 時間 16 分 13 秒短縮できる結果となり、比率では加工時間を 79%削減できたことになった。また、仕上げ工程を切削加工で行うことで放電加工用仕上げ電極も不要となる事も判明した。さらに、放電加工において仕上げ加工まで行った場合は、その後に変質層を除去する必要性が生じる事は 3 節の結言にて述べたが、3-D 形状の仕上げ加工を複合加工法にて行った場合でも荒加工における表面変質層も加工の際に除去できるため、新たな除去作業を不要とすることが出来る事となる。電極加工に関する時間とコストも削減できるものであり、当加工法は 3-D 形状に関しても十分使用可能であるという結果を得られた。

2.7 結論

本研究は、形彫放電加工において荒加工段階で超高速回転ミーリング加工に同機械上で切り替え加工を行うことで、加工時間、加工精度及び形彫放電加工機での超高速ミーリングの複合加工の適応性について検討したものである。今までのミーリング加工と違い放電荒加工面への加工のため、従来のデータでは対応できない点が生じる。そのため、放電荒加工面に対する超高速回転ミーリングの加工条件及び表面精度を明らかにする研究である。

まず、切り込み深さと残留放電痕の関係についての実験では、放電荒加工面に対する最小な切り込み値が判明したとともに、数式化することができ、

$$\text{切り込み量 } Z [\mu\text{m}] = 1.7 \times R_y$$

という公式を得た。

次に、放電荒加工面において超高速回転ミーリング最小切り込み量での最大ピック量の選定の実験では、最大ピック量を選定することができた。

$$\text{最大ピック量}(Y) = 50 \mu\text{m}$$

また同時に最小切り込み量と最大ピック量における超高速回転ミーリング最適条件での表面粗さを得ることができ、形彫り放電加工機と同等の表面精度が得られることがわかった。

$$\text{放電荒加工面 } 15 \mu\text{m}/R_y \text{ では } 1.2 \mu\text{m}$$

$$\text{放電荒加工面 } 25 \mu\text{m}/R_y \text{ では } 2.60 \mu\text{m}$$

同時に、6軸センサの測定結果より、放電荒加工面に対して超高速回転ミーリング加工を行う場合における機械軸に加わる Force/Torque も明確となり、また超高速回転ミーリングにおける加工方向に対する Force/Torque のかかる向きも明確となった。超高速回転ミーリングにおける Force/Torque は、ごくわずかなものであり、形彫放電加工機において超高速回転ミーリングが使用可能であることが判明し、複合加工の可能性が見出された。

そこで以上の結果をふまえ、実際に半球状の3次元形状の加工を行い、放電加工のみで仕上げる場合と複合加工を用いて仕上げる場合との加工時間を比較した。これにより複合加工法を用いることによって、加工時間をおよそ 1/5 に短縮することができた。また、表面粗さでは形彫放電加工機とほぼ同程度の精度が得られたことから、複合加工法がより実用的であることがわかった。

放電加工のみ **6 時間 38 分 36 秒**

複合加工 **1 時間 22 分 23 秒** 79%の時間短縮

最後に、本研究を行ってきた中で問題視された点を列挙し、今後の課題として以下に示す。

1. 深溝加工を施す際の加工法について
2. 鋭角を有する形状やエッジ部の加工法について
3. 焼き入り材料での超高速回転ミーリング加工の試み
4. 精度向上のための軸のA T C化
5. 6 軸センサのデータをリアルタイムで機械にフィードバックさせ、加工を制御する。

謝辞

本研究及び本論文は、小林和彦のご指導の元に行われ、完成するに至りました。終始御指導、ご鞭撻を賜りました同教授に厚く御礼申し上げます。

共同研究者の静弘生氏には研究を進めるにあたり、多くの御教示、御助言を頂くと共に、研究外の事柄に対しても非常に御世話になり、同氏に深く感謝の意を示すものであります。

また、電気加工研究室及び長尾研究室の方々には本研究の完成に際し、ご援助、ご協力を頂いた事に関して感謝し、御礼申し上げる次第であります。

参考文献・資料

- 1)岸雅一：形彫放電加工の高度自動化システムの研究
P3-1～P3-22
- 2)岸雅一：形彫放電加工の高度自動化システムの研究
P.序 4
- 3)三菱電機：三菱 NC 形彫放電加工機 VX シリーズ 取扱説明書
P.IV-80～IV-86
- 4) 安斎正博：高速・高精度な金型加工を実現するためには
精密工学会秋季大会 2001 年度講演論文集 P.314
- 5) 武藤一夫 高松英次：金型設計・加工技術
P.155
- 6) 武藤一夫 高松英次：金型設計・加工技術
P.165
- 7)向山芳世：形彫・ワイヤ 放電加工マニュアル
P.78～81
- 8)ツールエンジニア編集者：エンドミルのすべて
P50～54

付録 1

Force/Torque データ

切り込み深さと残留放電痕の関係についての Force/Torque の結果

1. 放電荒加工面 $15\ \mu\text{m}/\text{Ry}$

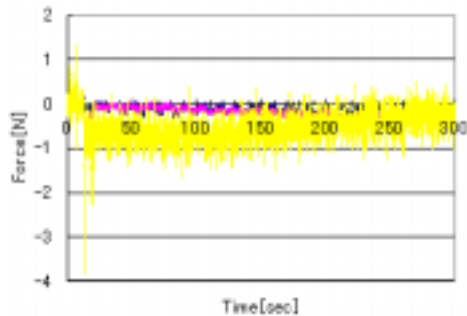


図 F-1 切込み量 $15\ \mu\text{m}$ における Force

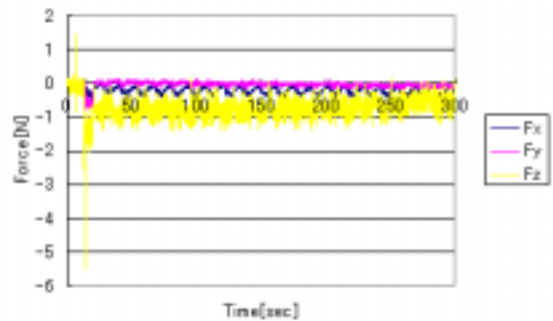


図 F-2 切込み量 $20\ \mu\text{m}$ における Force

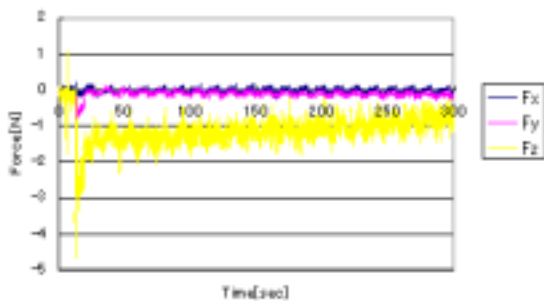


図 F-3 切込み量 $25\ \mu\text{m}$ における Force

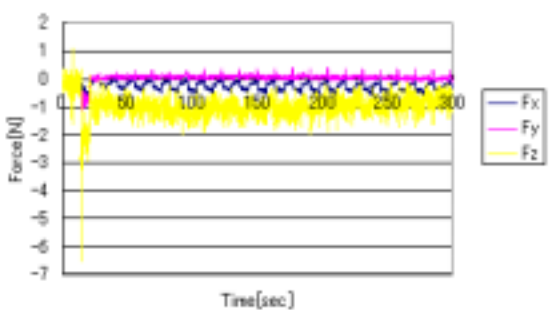


図 F-4 切込み量 $30\ \mu\text{m}$ における Force

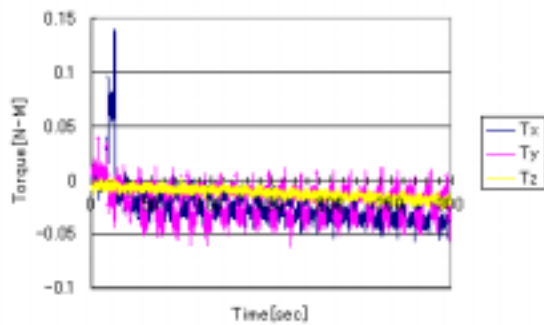


図 F-5 切込み量 $15\ \mu\text{m}$ における Torque

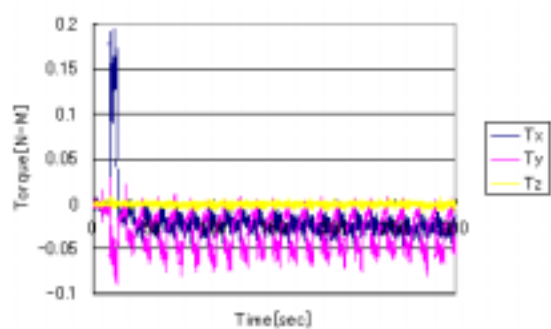


図 F-6 切込み量 $20\ \mu\text{m}$ における Torque

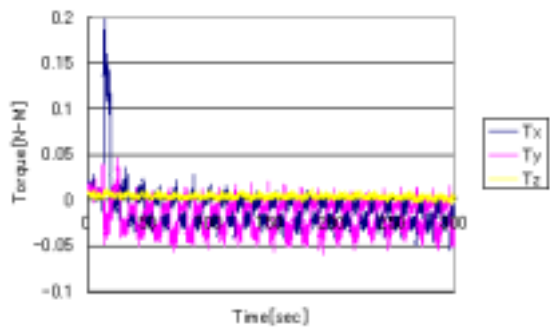


図 F-7 切込み量 $25\ \mu\text{m}$ における Torque

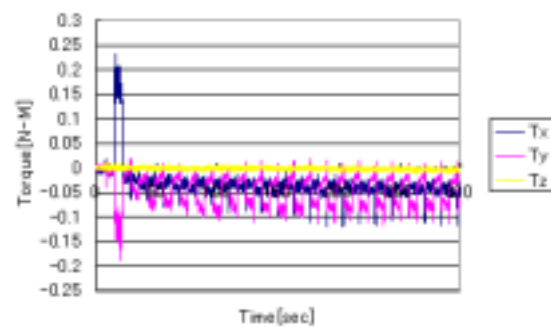


図 F-8 切込み量 $30\ \mu\text{m}$ における Torque

2. 放電荒加工面 $25\ \mu\text{m}/R_y$

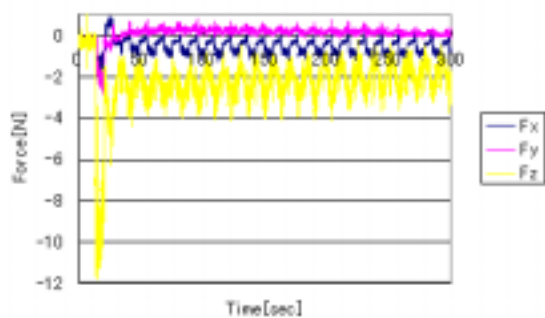


図 F-9 切込み量 $25\ \mu\text{m}$ における Force

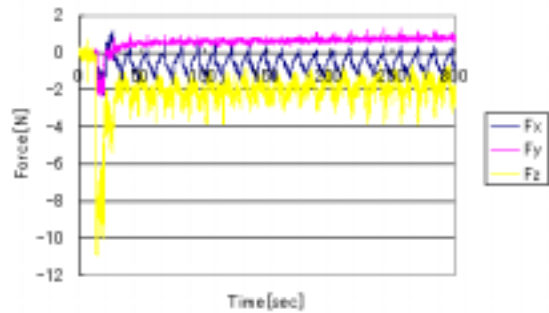


図 F-10 切込み量 $35\ \mu\text{m}$ における Force

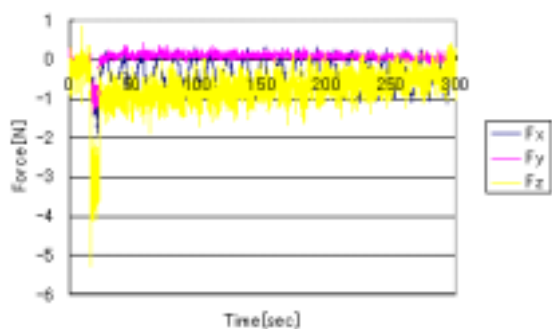


図 F-11 切込み量 $40\ \mu\text{m}$ における Force

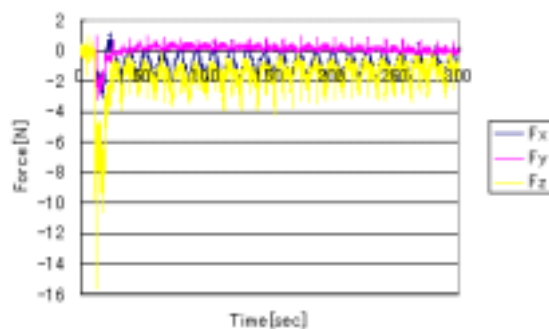


図 F-12 切込み量 $45\ \mu\text{m}$ における Force

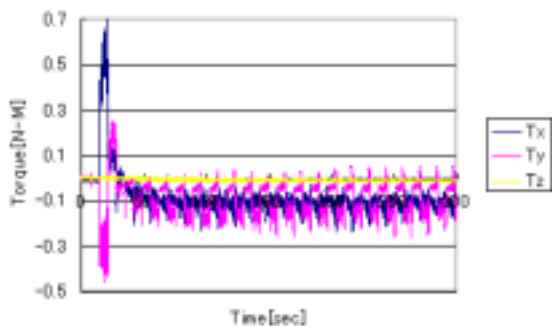


図 F-13 切込み量 $25\ \mu\text{m}$ における Torque

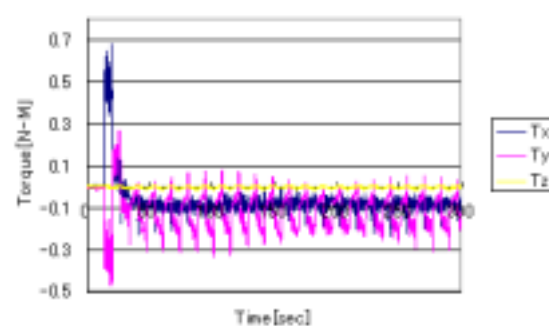


図 F-14 切込み量 $35\ \mu\text{m}$ における Torque

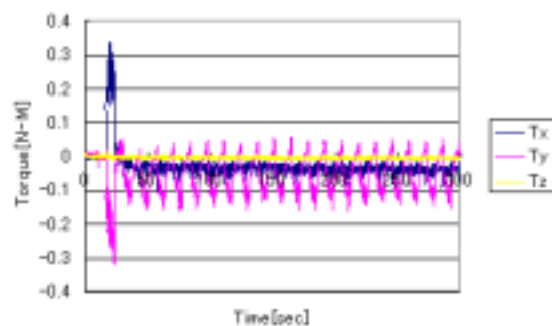


図 F-15 切込み量 $40\ \mu\text{m}$ における Torque

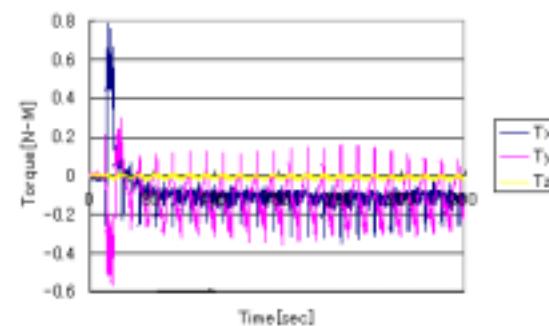


図 F-16 切込み量 $45\ \mu\text{m}$ における Torque

超高速回転ミーリング最小切り込み量での最小ピック量の選定の Force/Torque 結果

1.放電荒加工面 15 $\mu\text{m}/\text{Ry}$

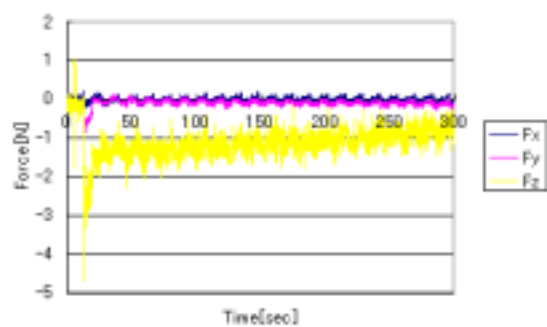


図 F-17 ピック量 10 μm における Force

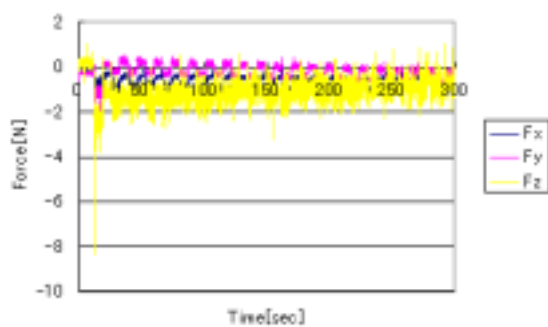


図 F-18 ピック量 50 μm における Force

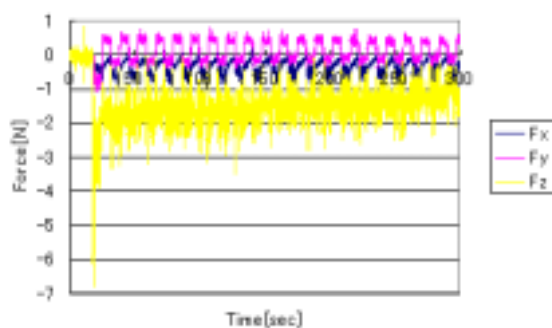


図 F-19 ピック量 75 μm における Force

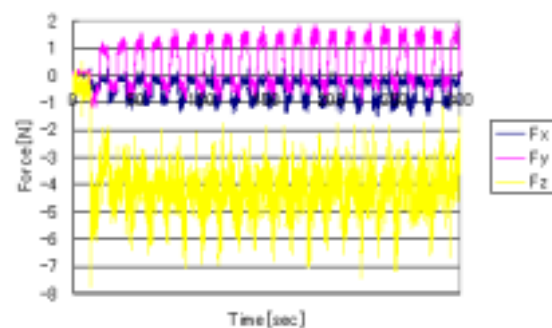


図 F-20 ピック量 100 μm における Force

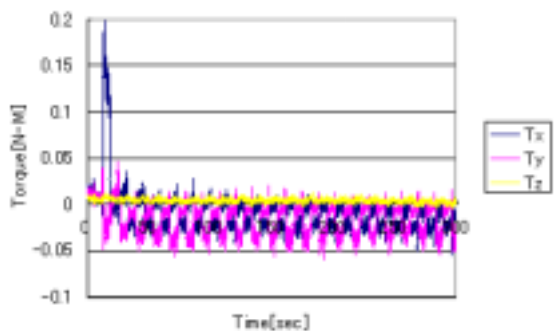


図 F-21 ピック量 10 μm における Torque

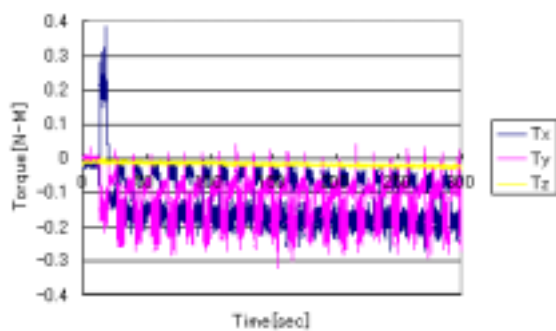


図 F-22 ピック量 50 μm における Torque

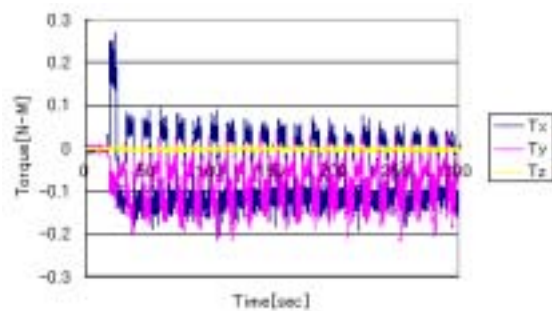


図 F-23 ピック量 75 μm における Torque

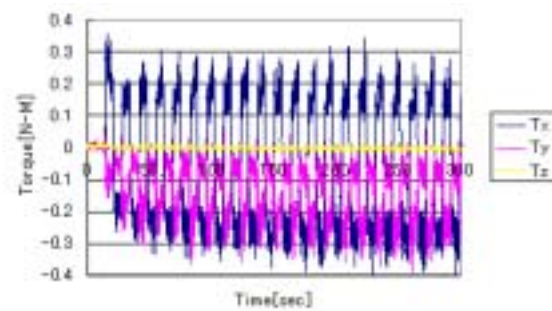


図 F-24 ピック量 100 μm における Torque

2.放電荒加工面 $25\ \mu\text{m}/\text{Ry}$

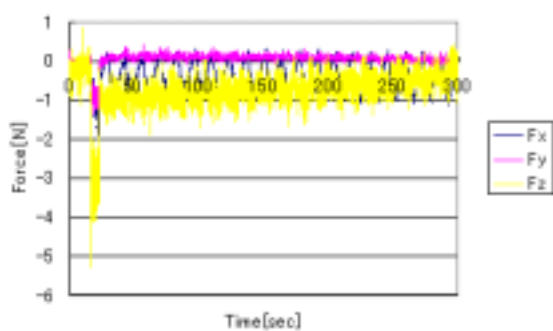


図 F-25 ピック量 $10\ \mu\text{m}$ における Force

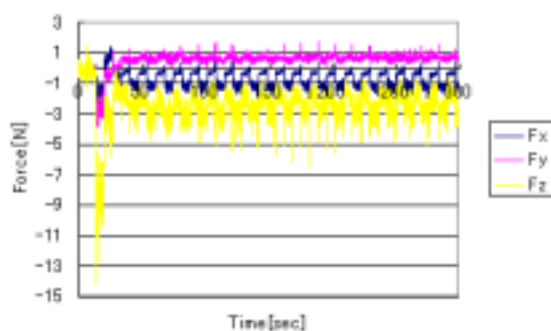


図 F-26 ピック量 $20\ \mu\text{m}$ における Force

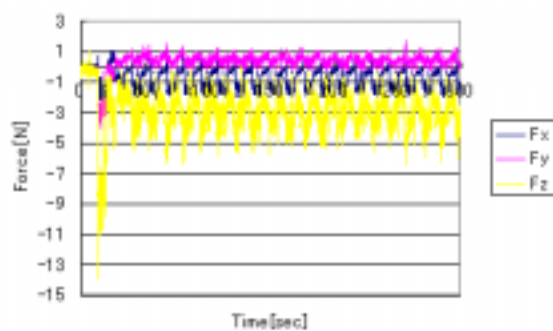


図 F-27 ピック量 $30\ \mu\text{m}$ における Force

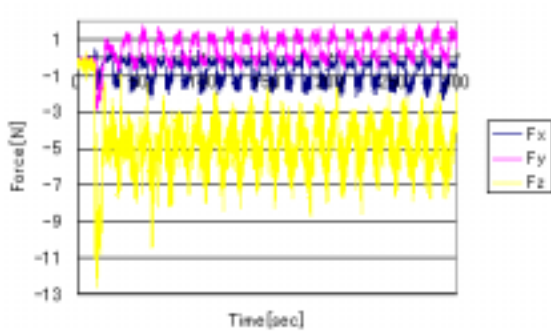


図 F-28 ピック量 $50\ \mu\text{m}$ における Force

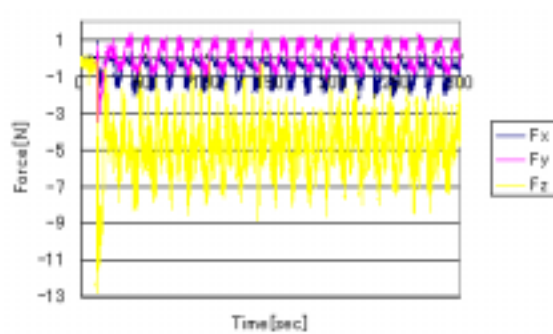


図 F-29 ピック量 $75\ \mu\text{m}$ における Force

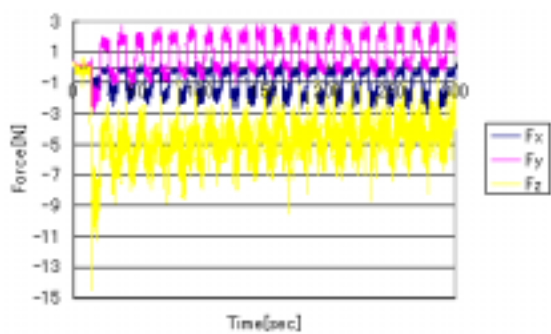


図 F-30 ピック量 $100\ \mu\text{m}$ における Force

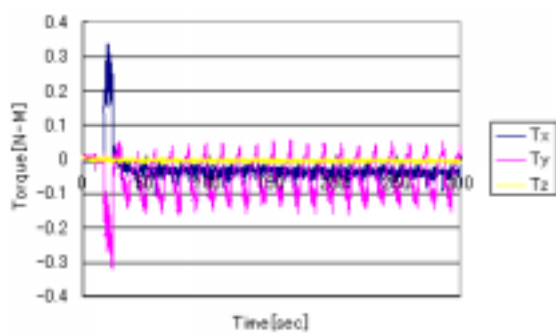


図 F-31 ピック量 10 μm における Torque

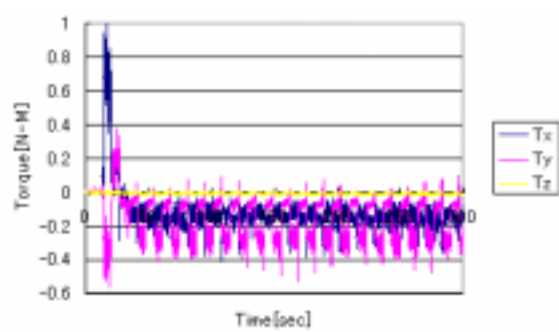


図 F-32 ピック量 20 μm における Torque

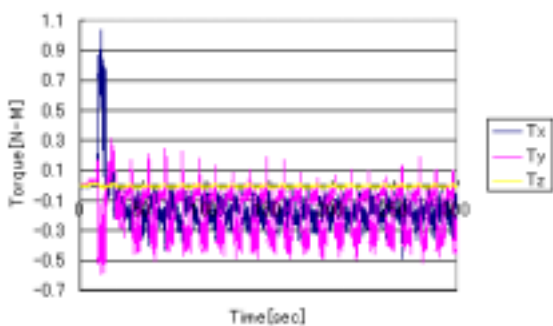


図 F-33 ピック量 30 μm における Torque

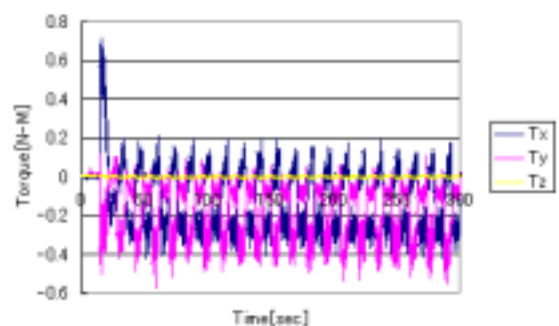


図 F-34 ピック量 50 μm における Torque

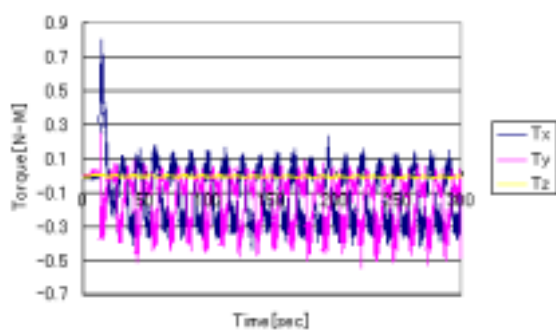


図 F-35 ピック量 75 μm における Torque

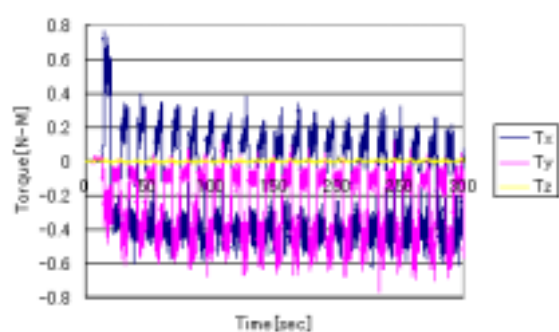


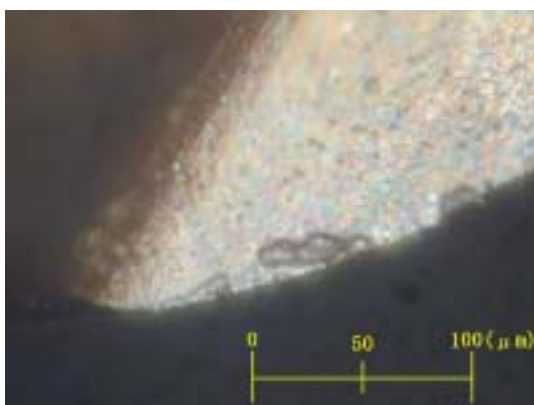
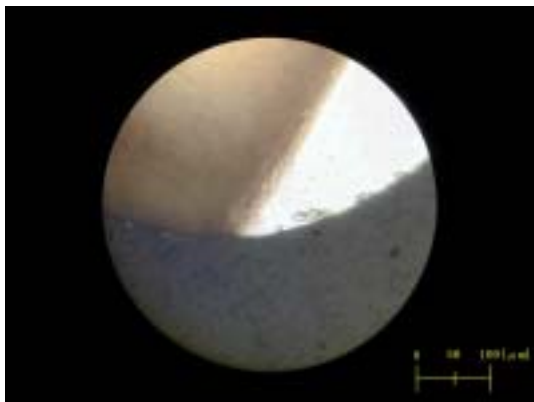
図 F-36 ピック量 100 μm における Torque

付録 2

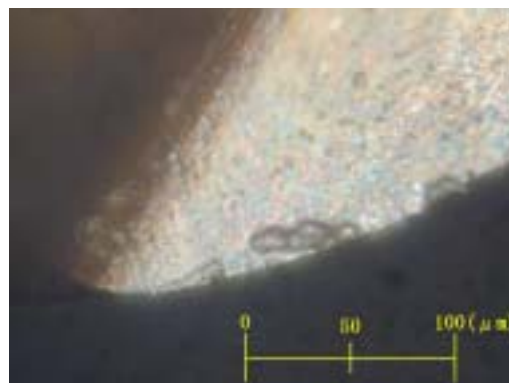
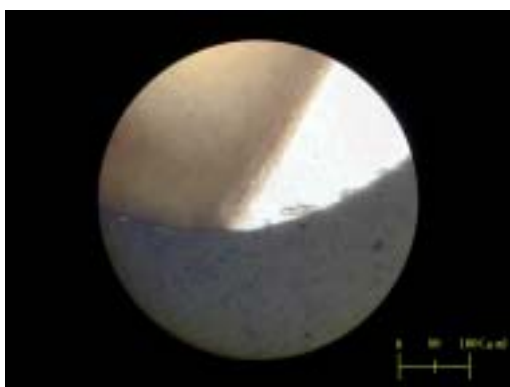
エンドミルの加工距離と磨耗についての顕微鏡写真

エンドミルの加工距離と消耗について、任意に設定した加工距離において、ボールエンドミルの顕微鏡写真を撮影した。

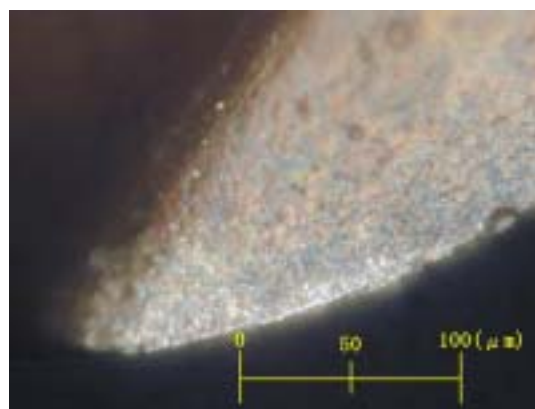
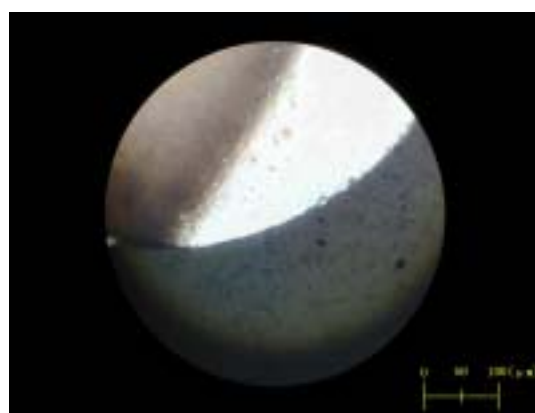
エンドミル新品



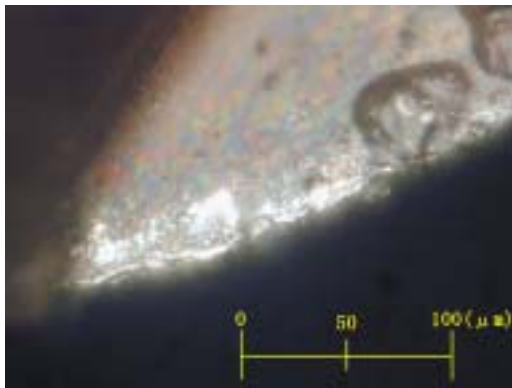
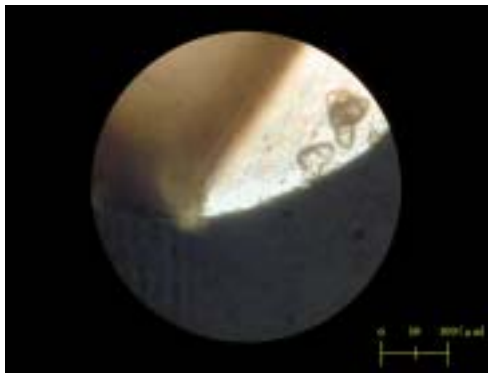
1m 加工後



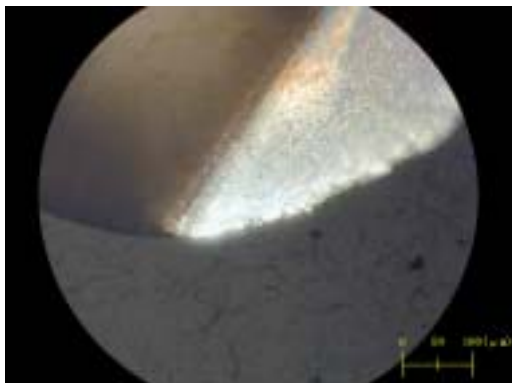
2m 加工後



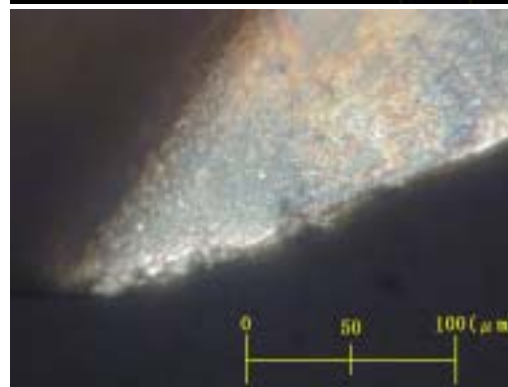
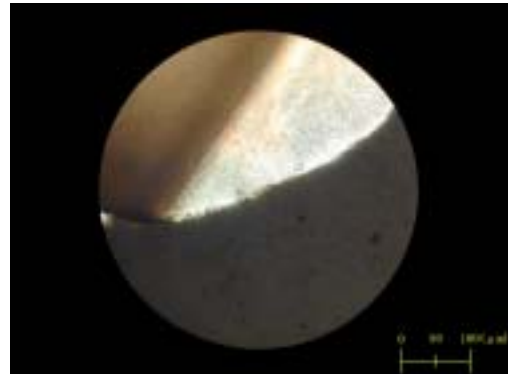
5m加工後



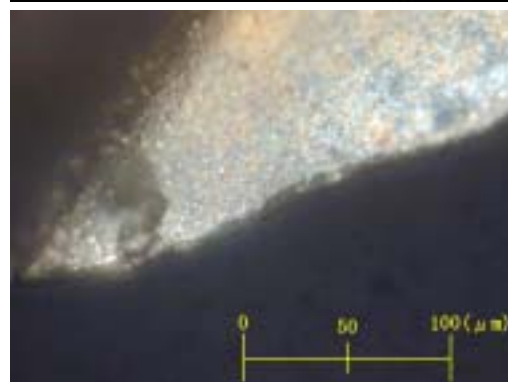
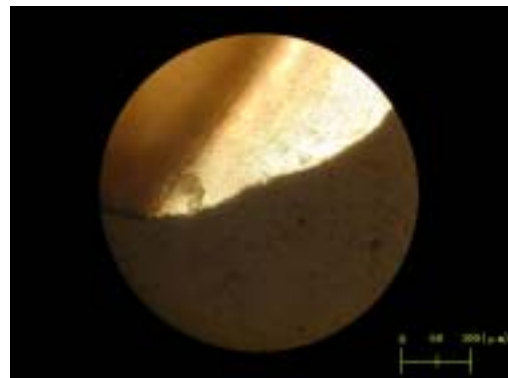
10m 加工後



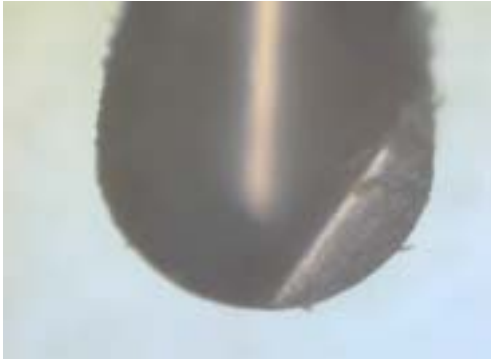
20m 加工後



30m 加工後



新品



30m加工後



