

ワイヤカット放電加工

セカンドカットによる加工特性

指導教員 小林和彦教授

知能機械システム工学科

1020149

堀端 勇介

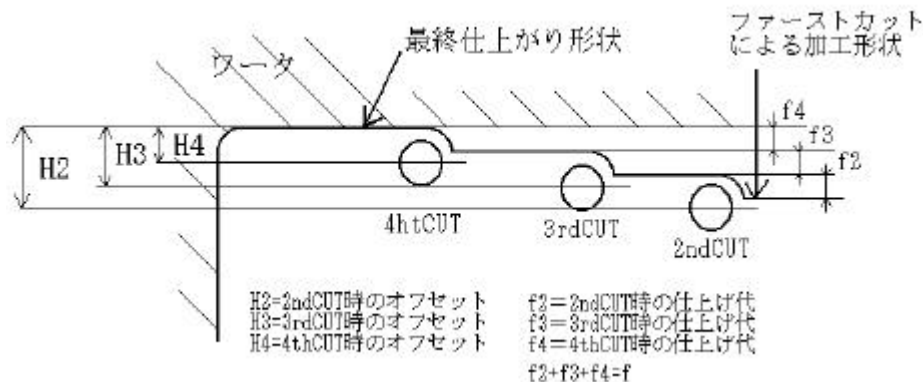
目 次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 ワイヤカット放電加工とは	3
2.1 ワイヤカット放電加工機の概要	3
2.2 放電加工の原理	5
2.3 加工特性	7
2.4 従来技術	8
第 3 章 セカンドカット加工における面粗さ	10
3.1 実験目的	10
3.2 実験方法	10
3.3 実験結果	14
3.4 考察	18
第 4 章 加工送り速度とオフセット量(切り込み量)による除去厚さ	21
4.1 実験目的	21
4.2 実験方法	21
4.3 実験結果および考察	23
4.3.1 切り込み量に対する面粗さ結果	23
4.3.2 切り込み量と加工面粗さの関係	25
4.3.3 加工送り速度と切り込み量による除去厚さ結果	27
4.3.4 切り込み量と除去厚さの関係	28
4.3.5 セカンドカット(2nd)加工の除去厚さ式	30
4.3.6 ワイヤのたわみ量の推定	32
第 5 章 結言	35
謝辞	37
参考文献	37

第1章 緒言

ワイヤ放電加工機は、銅、黄銅あるいはタングステンなどの細いワイヤ電極により被加工物を糸鋸式に加工する加工機である。一般的には二次元形状の金型、放電加工電極の加工、プロファイルゲージ加工、微細加工などに幅広く利用されようになった。その後のたび重なる性能向上が実を結び、飛躍的に金型業界を中心に浸透・拡大してきた。現在では精密加工には不可欠の加工法にまで成長し、金属加工に技術革新を巻き起こした技術である。

ワイヤ放電加工には、加工対象物により要求される加工精度より大別して二通りの加工方法がある。ファーストカット(1st)だけで終わる方法と、セカンドカットを適用する方法である。ファーストカットとは要求される寸法誤差が $\pm 0.05\text{mm}$ 程度で、 $15\mu\text{mRmax}$ 前後の面粗さが許容される場合に用いられ、プログラムされた図形を一筆書きで一周して加工を終了させる方法である。精度をある程度犠牲にしても緊急に製品が必要なときにこの方法が用いられる。しかしファーストカットだけで加工を終わらせた場合、加工精度の観点からいろいろな問題が残り、高精度を要求される加工には適用が非常に難しい。これを解決するために工夫されたのがセカンドカット加工法である。加工歪みなどを考慮して仕上げ代を残し、荒加工としてファーストカットを行い、残った仕上げ代をオフセット量と電気条件を少しずつパワーの低い電気条件に切り替え、数段階に分けて仕上げてゆく方法である。2回目から最終回(2nd、3rd、4th...)の仕上げ加工を総称して、セカンドカットと呼んでいる。オフセット量とは図1.1に示すように、残した仕上げ代を最終仕上げり形状まで加工していくプロセスの中で、プログラム上の軌道をゼロとし、そこからワイヤ径補正(H2,H3,H4)をかけた値のことである。ワイヤ径補正は、ワイヤの半径と放電クリアランスを足したものであり、電気条件が変化するとその値も変化する。



セカンドカットの特徴

- (a) コーナ部のだれを解消して、はめあい精度を向上させる。
- (b) 太鼓形状を修正し、加工面の真直度を改善する。
- (c) 加工表面に残った変質層を除去し、型寿命を伸ばす。
- (d) “へそ” を取り除く。

などが知られている。しかし必要以上にセカンドカットの回数を増やすことは、当然加工時間が長くなることや、ワイヤの消費量を大きくしてしまうのが問題としてとりあげられる。これらを改善していくためには、セカンドカットの仕上げ段階を明らかにし、セカンドカット加工のメカニズムを十分に理解が必要である。

本研究では、ワイヤカット放電加工機の加工精度の向上をテーマにして、セカンドカット加工法における

1. 加工送り速度やオフセット量、切り込み量の変化に対する面粗さの変化
2. 加工送り速度と切り込み量を変化させたときの除去厚さの変化

について研究を進めたものである。

第2章 ワイヤ放電加工とは

2.1 ワイヤカット放電加工機の概要

ワイヤカット放電加工機は、黄銅、銅、タングステン、モリブデンなどの細いワイヤを巻き取りながら、これを電極として2次元輪郭形状を数値制御により送りをかけ、糸鋸式に輪郭をくりぬいて加工する放電加工機である。図2.1に加工機全体の簡単な原理図を示す。

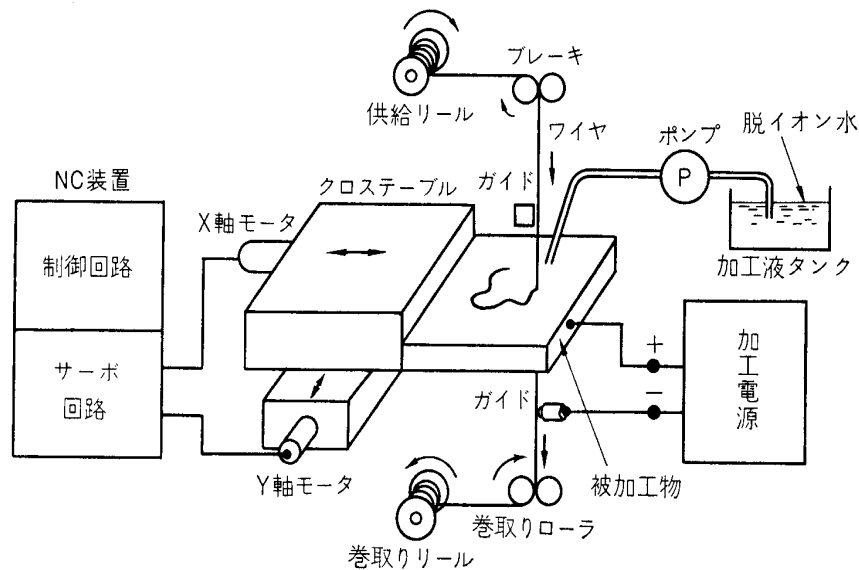


図 2.1 ワイヤ放電加工機の原理図

一般に放電加工機は銅やグラファイトなどの比較的加工しやすい導電性材料を工具電極とし、鋼、超合金などの被加工物材料との間に60～300V程度のインパルス電圧を印加しながら、間欠的火花放電を行わせ、その際に発生する異常消費現象を利用した加工法である。電極と被加工物の対抗する極間隙長は非常に狭く、5～50 μm であり、その間隙にはケロシン(灯油)や水などの絶縁液(加工液)を介在させる。

ワイヤカット放電加工機もメカニズムとしては上記のとおりであるが、電極としてワイヤを用いる点が異なっている。

ワイヤカット放電加工機的主要な役割としては、一般の抜き型はもとより、極薄板(0.05mmのステンレス鋼板)の精密抜き型、順送り型などの製造にいたるまで、活用されている。そして、その出現により、抜き型の工作法は画期的な変化を遂げ、製作費の原価低減(例えば1/3)、製作期間の短縮(例えば1/5)を実現し、金型などの設計に関しても設計時間の大幅な短縮など、著しい変革を及ぼした。

被加工物を積載しているクロステーブルは、一般にNC制御サーボモーター駆動により、

X,Y 軸方向に送りが与えられ、2次元形状の加工が行われる。

ワイヤカット放電加工機の加工に使われるワイヤ径は、通常 0.05~0.25mm であるがワイヤ切れなどのトラブルの防止を考慮して 0.1mm 以上が多く用いられる。

ワイヤは常に供給リールから一定の速度で送り出されており、放電による電極消耗を補正している。

加工液（絶縁液）は、水あるいはケロシンが用いられるが、取り扱いが簡単であり火災の心配が無く加工部分とワイヤの冷却が良く、さらに加工粉の除去が良好であり、炭化物やタールの発生がなく、加工を安定に保つことができるなどの理由から、現在ではほとんど水が加工液として使用されている。

加工送り速度は被加工物材質、板厚、ワイヤの種類などで変化するが、一般に知られている加工速度は、板厚 5mm の鋼（SKD - 11）を加工する場合で、最大送り速度は 7mm / min（35 / min）程度、また 80mm 板厚の場合は 0.75~0.8mm / min（60~64 / min）である。最近では、110 / min の速度が得られるものも出現したが、それにしてもレーザー加工機などに比べればそれほど速いものではない。しかし、加工精度としては $\pm 5\mu\text{m}$ ほどであり、加工精度が非常に高い。よって、抜き型などの高精度の生産加工に使用できるところに、ワイヤカット放電加工機の重要な存在意義があるのである。

現在の主要な工業材料としてのプラスチック、ニューセラミックスの加工法を考えても、耐食性と磨耗性の高い材料を用いた高精度の加工が必要とされており、ワイヤカット放電加工機を含む電気加工機の役割は一層重要となっている。

2.2 放電加工の原理

加工原理は形彫放電加工の場合と同じで、これを簡単に示すと図2.2のようになる。
図 2.2 に示すように次の順序で工作物の除去が行われる。

(1) 火花放電の発生

適切な張力で引っ張られながら送給されるワイヤ電極と工作物を対抗させ、ワイヤの周囲を包むように脱イオン水を上下から吹きかけつつ、工作物に向けてワイヤ電極を送り込んでいく。やがてその隙間（極間）が数 10 μ m程度に近づくと、極間にかかっているパルス電圧によって、脱イオン水で保たれていた極間の絶縁が破壊され、そこに火花放電が発生する。

(2) 金属溶解

火花放電が発生した箇所にパルス電流が瞬時に流れ込み、電流が持続している間アーク柱となる。そして、これを中心としてワイヤおよび工作物の一部が数千度の高熱にさらされて溶解が始まる。

(3) 爆発と金属溶解の飛散

アーク柱を中心にして、これを取り巻いている水も急激に温度上昇し即座に気化して急激な体積膨張を起こす。これによって極間の一部に爆発現象が発生し、工作物および電極表面の溶解金属を極間から吹き飛ばす。

(4) 極間の冷却、加工屑の排除

電流の供給が終わると同時に極間にはきれいな水が流入し、溶解金属は冷却されて、細かな粒となって洗い流され、その跡にくぼみが生成される。極間は再び絶縁が回復し、つぎのパルス電圧の供給を待つ。

このように電圧パルス一発ごとに金属の溶解、除去が行われるが、これは毎秒数十万回繰り返される。その蓄積によってワイヤに向かい合った工作物面に溝が形成され、ワイヤの移動した軌跡にそって工作物は二次元輪郭形状にくり抜き加工される。

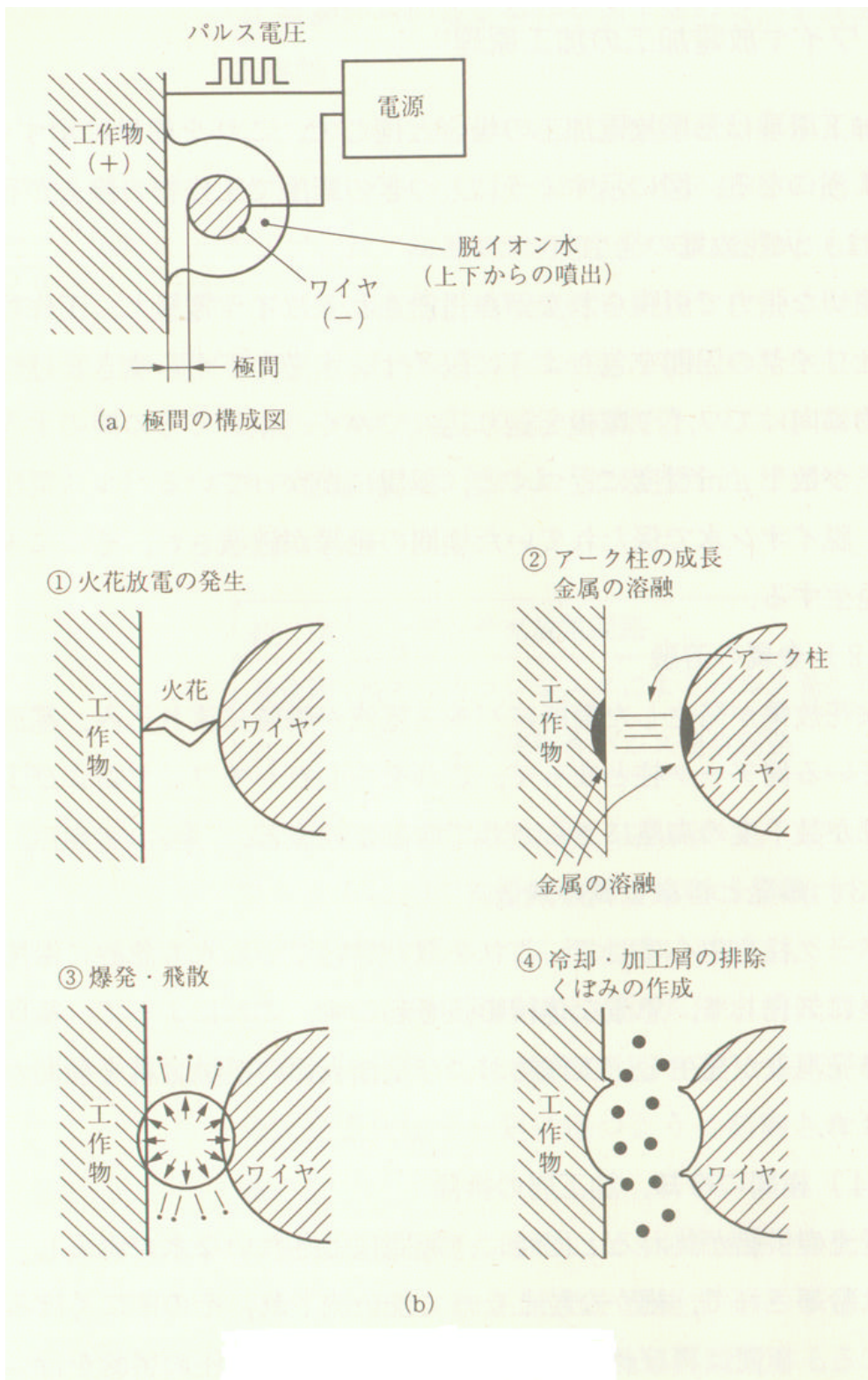


図 2.2 ワイヤカット放電加工の原理

2.3 加工特性

以下にワイヤカット放電加工機の利点、及び欠点を記した。

(1) 利点

材料の硬さに関係なく加工できる

導電性を有する材料であれば、どんなに硬い材料でも加工できる。超硬合金はもとより、ダイヤモンド複合材や伝導性のセラミックスさえも容易に加工できる。

特殊な工具を必要としない

比較的安価な、細い金属線が刃物のかわりに使用でき、切削加工に必要な刃物や形彫放電加工に必要な専用の電極を必要としない。

形状の制約がない

円弧と直線の組み合わせ、または自由曲線で描くことのできる形状であれば、切削や研削では実現できない複雑形状や、微細な形状の加工が作業工程の変更を行うことなく実行できる。

高精度の加工ができる

工作物の加工歪みを修正でき、また面粗さも $0.5 \mu\text{mRmax}$ と非常に細かい面が得られるため、ミクロン単位の高い精度の加工が可能である。

バリが出ない

バリを出さずに加工ができ、あとでこれを取り除く作業の必要がない。

大物から超小物まで加工範囲が広い

1m を超すような大きな製品から、肉眼では判別できないような微細加工まで、幅広い範囲の加工に対応できる。

火災の発生がない

加工液に水を使っており、火災を発生する心配がまったくない。

(2) 欠点

底のある加工ができない

形彫放電加工が得意とする、底付き穴（キャビティ）の加工ができない。

加工速度が遅い

容易に切削できる材料の単純な平面加工では、切削加工に比べ加工速度で見劣りがある。

シャープなインコーナを加工できない

ワイヤ径の半分 + 放電ギャップ分の R がインコーナに残り、切削のような真にシャープな加工はできない。

真直面を作るのが困難

厚い材料の加工では、太鼓形状となるため、研削面のような真直な平面の加工は実現できない。

2.4 従来技術

放電加工について

放電加工は、電極と被加工物とを、灯油、水などの加工液を介して数ミクロンないし数10ミクロン（ μm ）の隙間に対向させ、高い繰り返し数のパルス状の放電電流を発生させて生ずる放電痕の累積によって加工を行うものである。パルス状の電流とはほぼ一定波高値、一定時間幅の電流が、オンとオフを繰り返し断続して流れる状態である。

電極と被加工物の間に加える電源から出てくるパルス電力は、電圧が数10ボルトないし数100ボルト。電流が数アンペアないし数100アンペア。放電繰り返し数は、毎秒数1000ないし数10万回程度が使用される。

極間においては、放電電流が一定短時間流れては消えるという、放電と消弧を繰り返し発生させ、1回のパルス電流によって1個の放電痕を生じ、その累積によって形彫放電加工の場合には、電極形状と加工形状が雌雄の関係に加工される。

両極間の極間距離は加工の進行によって増加しようとするが、放電が継続して発生できるようにこれを自動制御によって追尾し、離れすぎて放電が発生しなかったり、近づきすぎて短絡を生じることのないような距離を保つ。

放電間隙の大きさは数 μm ないし数10 μm であり、電極と被加工物の嵌合精度も、これに準拠した値となり、加工精度の基本となる。

加工によって極間に生ずる金属加工粉、加工液の分解物（ガス、カーボン、タール）は、加工により生ずる爆圧（加工液の急速熱分解）、加工液の強制循環、電極の上下動によるポンプ作用によって、極間から排除されますが、できるだけ清浄化することが良い加工結果を得ることができる。

放電加工方式には大別して次の二つの方式がある。ひとつは、特定形状の電極を用いてその形状を投影加工する「形彫放電加工方式」で、他のひとつはワイヤ電極を巻き取りながら糸鋸式に二次元輪郭を加工する「ワイヤ放電加工方式」がある。

形彫放電加工を簡単に説明すると、通常加工油中で行われ、銅、グラファイトなどの電極を加工したい形状の凸型に形成し、その電極をワーク上に押し付けて凹型形状を形成していく。放電電極は、切削加工、ワイヤ放電加工などで生成された電極を用い、加工条件に応じたクリアランス制御、電極交換、および位置決めなどが重要となっている。

ワイヤ放電加工は、常に供給されるワイヤ電極を使用し、加工液は水（イオン交換水）が使用される。ワイヤ径は通常0.05~0.25mmが加工目的に応じて使い分けられ、タングステンワイヤ、黄銅ワイヤが用いられている。又、形彫放電加工と違い、ワイヤ電極自体は形状に関する情報を持たないため、プログラミングで糸鋸式に任意の形状を切り取る加工方法である。

ワイヤ放電加工は初期段階、X，Y2軸によりテーブルを駆動し加工するものであった。

しかし適用分野が狭いという加工現場からの強い要望により、ワイヤ放電加工機によるテーパ加工という機能が開発された。この加工方法の出現により適用分野を飛躍的に拡大することに成功した。

テーパ加工とは図 2.3 のように上部ワイヤガイドも 1 軸（回転軸）もしくは 2 軸（U, V 軸）により駆動させることにより、 $\pm 5^\circ$ 程度以下の任意テーパ角度をもつ形状の加工を可能とした。すなわち同時 3 軸、もしくは同時 4 軸制御がかのうになるため、自由度が大きく 3 次元形状の加工が可能である。

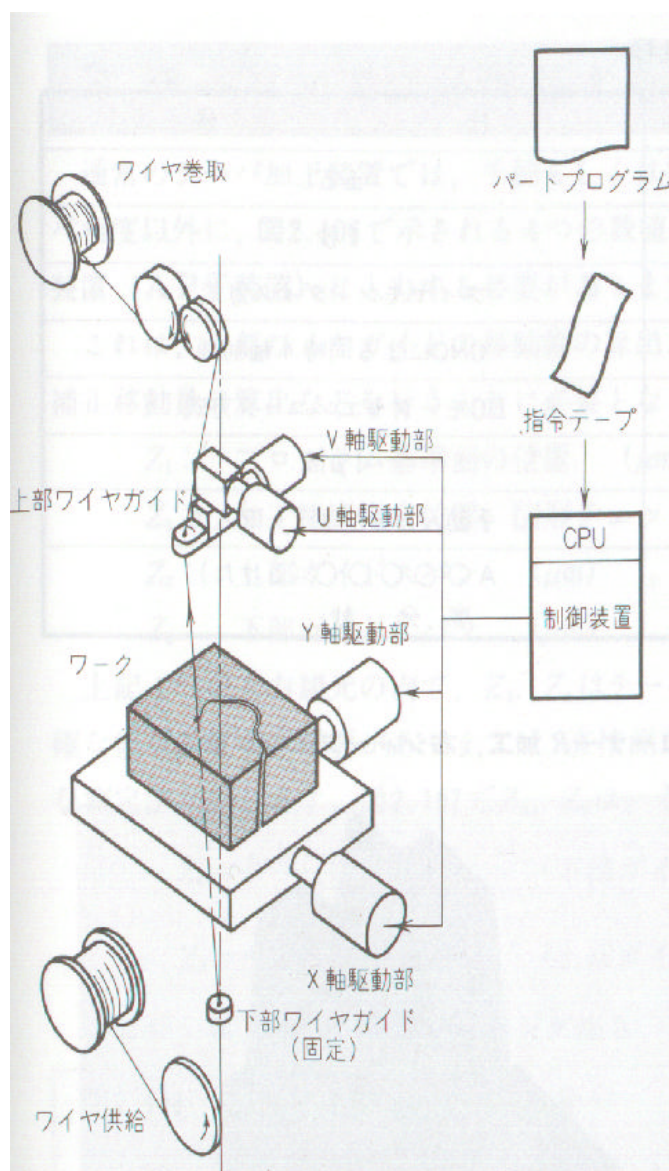


図 2.3 テーパ加工装置の構成

第3章 セカンドカット加工における面粗さ

3.1 実験目的

セカンドカット加工法は数段階に分けて行われるが、本調査実験ではセカンドカット加工(2nd)に重点をおき、加工送り速度を変化させたときの面粗さがどのように変化しているのかを調査する。比較する為に 3rd、4th Cut 加工も行う。

3.2 実験方法

まずワーク材料としてSKD 11(図3.6参照)を用い、ワイヤカット放電加工機(図3.3参照)により図3.1に示すように、厚さ10mmのワークを1st Cut加工により加工する。ワイヤは0.2mmのものを使用する。加工条件としては、電気条件E379(表3.1参照)、オフセット164(μm)、最適送りで加工した。形状は図4.2に示すように、凸の高さ3mm、縦10mm、横5mmの加工を行い、12個同じものを準備した。



図 3.1 SKD の凹凸加工

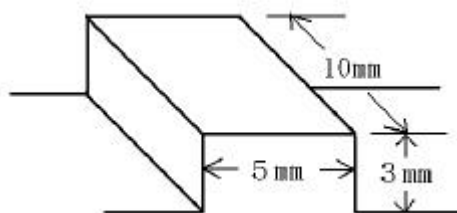


図 3.2 凸の拡大

次に、1st Cut 加工を行った後、凸の上面だけを 2nd Cut 加工で直線加工する。加工条件としては、電気条件E1065(表3.1参照)、オフセット104(μm)、加工送り速度は定速($F=2\sim 20$)で加工し、個々の凸形状ごとに加工送り速度を変化させる。3rd、4th Cut 加工においても比較するため、メーカーの取り扱い説明書に書いてある短絡を起こさせない範囲の条件で、加工送り速度を変化させて加工を行う。3rd Cut 加工時の電気条件はE1066(表3.1参照)を用い、オフセットは(1st = 179 μm 、2nd = 119 μm 、3rd = 104 μm)とし、4th Cut 加工時の電気条件にはE1067(表3.1参照)を用い、オフセットは(1st = 177 μm 、2nd = 122 μm 、3rd = 109 μm 、4th = 104 μm)で加工を行った。

加工後の面粗さの測定には面粗さ測定器(図3.4参照)を使い、凸部の加工表面を、ワイヤが進行した方向に面粗さ測定器の触針を走らして測定した。

さらに、面粗さの状態を詳細に観察するため、顕微鏡観察も行った。顕微鏡としては測定顕微鏡(図3.5参照)を用いた。

ワイヤカット放電加工機

三菱 DAIAX SX10 (図 3.3)

ワイヤ 沖電線
OB - 20P
0.2mm
黄銅ワイヤ



図 3.3 ワイヤ放電加工機の概要写真

加工条件 ノッチは加工機自体の設定値であるが、加工条件として E パック No で表すことにする。

表 3.1 1st 2nd 3rd 4th Cut加工の加工条件

加工段階	1st Cut	2nd Cut	3rd Cut	4th Cut
Eパック番号	379	1065	1066	1067
V0(ノッチ)電圧切替え	12	4	4	5
IP(ノッチ)加工セッティング	7	4	2	1
OFF(ノッチ)休止時間	1	1	14	3
SA(ノッチ)安定回路A	3	2	2	2
SB(ノッチ)安定回路B	10	16	3	16
WS(ノッチ)ワイヤ速度	12	10	10	10
WT(ノッチ)ワイヤ張力	8	10	10	10
PT(ノッチ)プリテンション	14	14	14	14
LQ(ノッチ)加工液流量	2	1	1	1
LR(ノッチ)加工液比抵抗	9	9	9	9
VG(V)平均加工電圧	43(41~45)	52(47~57)	35(30~40)	52(47~57)
SC(ノッチ)安定回路C	1	1	1	1
FS(ノッチ)FS電源	1	1	1	1
AE(ノッチ)電源モード	21	11	11	11
SE(ノッチ)安定回路E	1	1	1	1
FA(mm/分)設定加工速度	7.2	6	4	6
FC(mm/分)実加工速度	6.3~8.1	6.3~8.1	8.0~9.0	6.3~8.1
オフセット(μm)オフセット量		104	104	104
面粗さ(μmRmax)加工面粗さ	16~18	12~14	3~15	12~14

東京精密製 小型表面粗さ測定器 ハンディサーフ E 35A (図 3.4)

測定範囲 X 軸:12.5mm Z 軸: ±160 μm

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 μmR

測定力 4mN(0.4gf)以下

パラメータ(JIS)Ra,Rq,Ry,Rz,Rt,Sm,Pc,tp,Rpk



図 3.4 面粗さ測定器

測定顕微鏡 MITUTOYO TF - 510F (図 3.5)

形式 支柱直立型

接眼鏡筒 30 °

対物レンズ倍率 ×3、×10

接眼レンズ ×10

透過照明装置 反射照明装置



図 3.5 測定顕微鏡

加工材料 SKD11 (100 × 200 × 10 mm) (図 3.6)

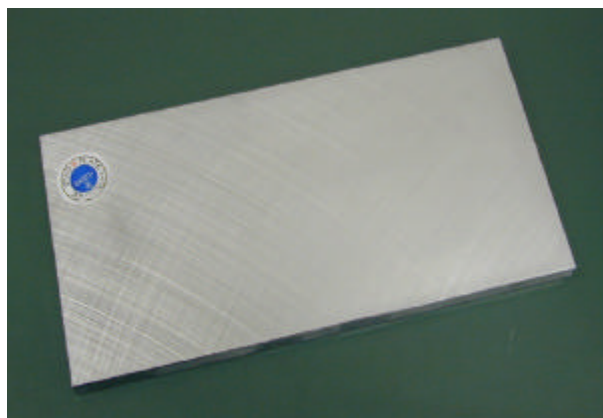


図 3.6 SKD-11

デジタルカメラ NIKON COOLPIX950

加工されたサンプル投影用
測定顕微鏡とデジタルカメラを取り付けるために、マイクロネット社製 N Y
pixW マルチシステム + C マウントを使用。

NC プログラム作成ソフト 三菱 MS20

NC プログラム作成後、パソコンからインターネットを通して加工機へ転送。

3.3 実験結果

加工条件一定のまま、加工送り速度 F=2~20 まで変化させ、2nd、3rd、4th Cut を行い、その場合の加工面粗さを面粗さ測定器で求めた結果を表 3.2、3.3、3.4 に示す。

なお、面粗さは規格として Ra、Ry、Rz を選択してそれぞれ表示した。

表 3.2 2nd Cut の面粗さ結果表

加工送り 速度 [mm/min]	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)	加工送り 速度 [mm/min]	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F=2	2.50	14.06	11.19	F=4	2.71	13.67	11.61
	2.65	14.06	11.48		2.85	14.45	12.15
	2.65	14.30	11.71		2.92	15.04	12.38
	2.67	14.40	12.17		2.93	15.19	12.61
	2.75	14.61	12.23		2.94	15.48	12.67
	2.75	14.75	12.24		2.99	15.53	12.68
	2.82	14.83	12.36		3.00	16.27	12.97
	2.84	14.98	12.41		3.06	16.31	13.17
	2.86	15.79	12.51		3.07	16.84	13.27
	2.91	15.80	12.83		3.09	16.92	13.83
F=6	2.71	14.39	11.63	F=8	2.74	15.13	12.26
	2.71	14.76	12.07		2.83	15.25	12.58
	2.85	15.39	12.33		2.86	15.80	12.65
	2.87	15.51	12.56		2.86	15.95	12.90
	2.87	15.70	12.58		2.92	16.22	13.00
	2.90	15.70	12.70		2.96	16.31	13.18
	2.98	15.86	12.80		3.04	16.48	13.22
	3.00	15.87	12.81		3.10	16.84	13.31
	3.03	16.42	12.94		3.11	16.99	13.32
	3.04	16.62	13.16		3.30	17.19	13.55
F=10	2.72	14.91	11.90	F=12	2.79	14.13	12.18
	2.74	14.95	11.93		2.94	14.87	12.23
	2.74	14.96	12.23		2.95	14.95	12.57
	2.85	15.08	12.37		2.97	15.84	12.90

	2.86	15.48	12.52		2.97	16.09	12.97
	2.86	15.49	12.73		3.01	16.16	13.13
	2.90	15.85	12.86		3.05	16.18	13.17
	2.97	16.09	13.02		3.09	16.34	13.34
	3.06	16.35	13.36		3.12	16.36	13.41
	3.08	17.67	13.88		3.14	17.60	14.21
F=14	2.88	15.43	12.75	F=16	2.51	14.82	11.88
	2.91	15.94	12.79		2.70	14.88	12.20
	2.93	15.95	12.84		2.80	15.22	12.70
	2.97	16.17	12.95		2.94	15.68	13.03
	2.97	16.45	12.99		2.97	16.36	13.40
	3.06	16.58	13.33		3.01	16.57	13.59
	3.08	16.74	13.37		3.09	16.85	13.60
	3.18	16.78	13.44		3.10	17.13	13.77
	3.22	16.99	13.66		3.16	17.15	13.95
	3.27	18.73	13.94		3.18	18.30	13.96
F=18	2.67	14.18	11.76	F=20	2.88	14.64	12.75
	2.75	15.66	12.42		2.91	16.08	13.11
	2.93	15.85	12.84		2.96	16.25	13.21
	2.98	15.88	13.07		3.01	16.41	13.44
	3.06	16.28	13.45		3.04	16.75	13.53
	3.17	16.40	13.67		3.11	16.78	13.59
	3.20	16.45	13.76		3.13	17.01	13.78
	3.21	16.46	13.93		3.19	17.40	13.78
	3.26	17.06	13.95		3.26	17.65	13.97
	3.32	17.14	14.34		3.39	18.60	14.95
最適送り	2.81	15.04	12.44				
	2.85	15.06	12.55				
	2.89	15.89	12.67				
	2.93	16.06	12.93				
	2.94	16.13	12.99				
	2.95	16.26	13.08				
	3.03	16.64	13.41				
	3.04	16.67	13.42				

	3.20	16.69	13.69				
	3.37	16.95	14.05				

表 3.3 3rd Cut の面粗さ結果表

加工送り 速度 [mm/min]	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)	加工送り 速度 [mm/min]	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F=2	0.52	3.04	2.83	F=4	0.53	3.18	2.77
	0.54	3.13	2.87		0.54	3.20	2.79
	0.54	3.19	2.92		0.54	3.21	2.81
	0.54	3.27	2.93		0.54	3.22	2.85
	0.54	3.32	2.95		0.54	3.25	2.89
	0.55	3.34	2.99		0.55	3.47	2.99
	0.56	3.42	3.05		0.56	3.52	3.02
	0.56	3.45	3.07		0.56	3.55	3.03
	0.57	3.60	3.09		0.58	3.57	3.14
	0.57	3.63	3.12		0.58	3.84	3.22
F=6	0.54	3.21	2.89	最適送り	0.57	3.39	3.01
	0.55	3.29	2.92		0.57	3.65	3.13
	0.55	3.33	2.94		0.58	3.66	3.17
	0.56	3.34	2.99		0.58	3.70	3.25
	0.57	3.60	3.05		0.59	3.72	3.25
	0.57	3.64	3.12		0.59	3.87	3.26
	0.58	3.64	3.23		0.59	3.87	3.29
	0.58	3.69	3.24		0.59	3.97	3.35
	0.59	3.75	3.29		0.60	3.98	3.39
	0.61	3.76	3.30		0.60	4.02	3.47

表 3.4 4th Cut の面粗さ結果表

加工速度 [mm/min]	Ra(μm)	Ry(μm)	Rz(μm)	加工速度 [mm/min]	Ra(μm)	Ry(μm)	Rz(μm)
F=2	0.47	2.89	2.57	F=4	0.47	3.00	2.56
	0.47	3.06	2.68		0.49	3.02	2.61
	0.48	3.07	2.71		0.49	3.02	2.63
	0.48	3.08	2.73		0.49	3.05	2.70
	0.49	3.08	2.73		0.50	3.05	2.73
	0.50	3.09	2.77		0.50	3.14	2.78
	0.50	3.11	2.83		0.50	3.20	2.79
	0.51	3.13	2.85		0.50	3.36	2.96
	0.51	3.14	2.87		0.52	3.47	2.98
	0.53	3.25	2.88		0.52	3.48	2.99
最適送り	0.48	2.81	2.51				
	0.48	2.82	2.54				
	0.49	2.98	2.67				
	0.49	3.12	2.71				
	0.50	3.35	2.90				
	0.51	3.40	2.97				
	0.52	3.57	2.98				
	0.53	3.64	2.98				
	0.54	4.06	3.14				
	0.54	4.07	3.22				

3.4 考察

以下の表 3.5、3.6、3.7 は、表 3.2、3.3、3.4 に記されている数値を、平均して値を算出したものであり、Ra、Ry、Rz ごとにグラフ図 3.7、3.8、3.9 に示した。

加工送り速度を最適送りで加工した場合も比較のためグラフにのせる。表示方法として 2nd は F=22、3rd は F=8、4th は F=6 とする。

表 3.5 2nd Cut の面粗さ平均結果表

加工送り速度 [mm/min]	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F=2	2.74	14.76	12.11
F=4	2.96	15.57	12.73
F=6	2.90	15.62	12.56
F=8	2.97	16.22	13.00
F=10	2.88	15.68	12.68
F=12	3.00	15.85	13.01
F=14	3.05	16.58	13.21
F=16	2.95	16.30	13.21
F=18	3.06	16.14	13.32
F=20	3.09	16.76	13.61
最適送り(F=22)	3.00	16.14	13.12

表 3.6 3rd Cut の面粗さ平均結果表

加工送り速度 [mm/min]	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F=2	0.55	3.34	2.98
F=4	0.55	3.40	2.95
F=6	0.57	3.53	3.10
最適送り(F=8)	0.59	3.78	3.26

表 3.7 4ht Cut の面粗さ平均結果表

加工送り速度 [mm/min]	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F=2	0.49	3.09	2.76
F=4	0.50	3.18	2.77
最適送り(F=6)	0.51	3.38	2.86

加工送り速度による面粗さ(Ra)

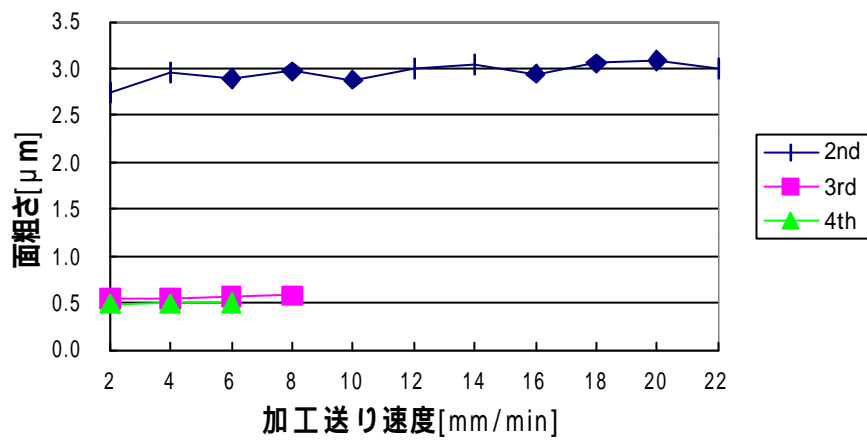


図 3.7 加工送り速度による面粗さ(Ra)の変化

加工送り速度による面粗さ(Ry)

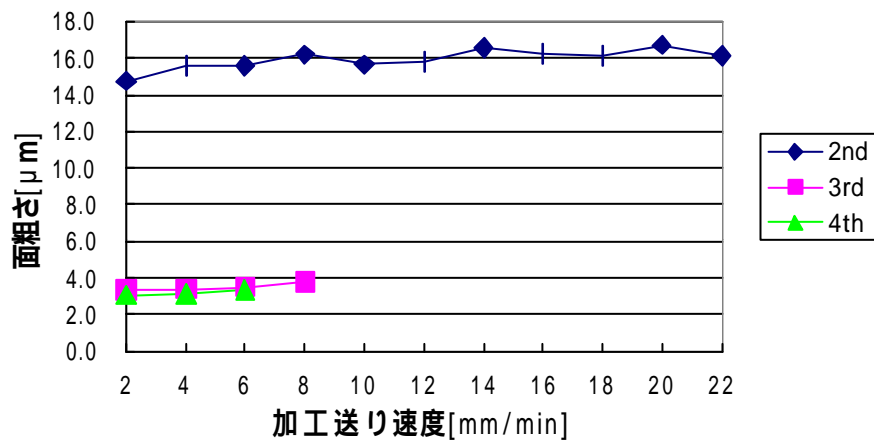


図 3.8 加工送り速度による面粗さ(Ry)の変化

加工送り速度による面粗さ(Rz)

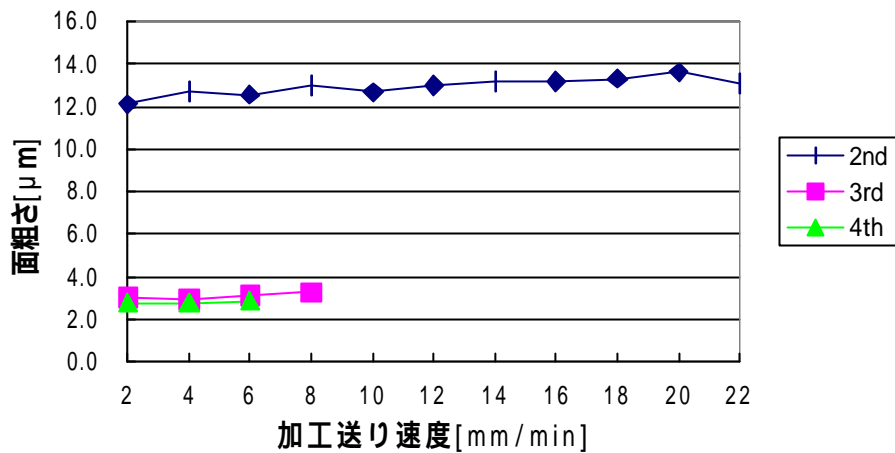


図 3.9 加工送り速度による面粗さ(Rz)の変化

放電加工の場合、面粗さに対して最も大きな影響を持つ因子は、パルスエネルギーを変化させるピーク電流値であり、図 3.7、3.8、3.9 から分かるように、面粗さへの影響は非常に大きい。ただし、3rd、4th はほとんど差がないのは、ピーク電流値にあまり差がないためである。

次に、ピーク電流値を一定にして加工送り速度に対する面粗さは、図 3.7、3.8、3.9 のとおり、わずかではあるが加工送り速度の上昇に従って面粗さが粗くなる傾向にあり、グラフはそれぞれ右肩上がりとなっている。しかし、加工送り速度が面粗さに対して及ぼす影響は、わずかであるという結果が得られた。

理論上、前述したとおりセカンドカットでは電気条件が一定の場合面粗さは変化しないといわれている。しかし加工送り速度の変化とともに面粗さが粗くなる傾向が得られた。その原因としては、測定顕微鏡により加工後の表面を拡大してみる(図 3.10)と細かいスジが確認されたことによって短絡現象が発生しているのではないかと考える。筆者は、前述した実験条件、つまり説明書に記載されている短絡しない範囲の加工条件で加工を行ったが、実際には微小な短絡現象が発生し、加工送り速度が速くなるにつれてその回数が徐々に増えていき、このことが面粗さを悪化させた原因ではないかと考えられる。

このスジの発生を抑えるにはオフセット量を大きく、つまりよせ量を小さくすることで解決できるのではないだろうか。



図 3.10 4th Cut による短絡をひき起こしている表面

倍率×100

第4章 加工送り速度とオフセット量(切り込み量)による除去厚さ

4.1 実験目的

第3章において使われていたオフセット量は、最終仕上がり形状を想定して仕上げ代を除去していくために、よせ量として使われていたが、今回の実験では切り込み量として考えた。よって、目的の切り込み量が正確に除去されているのか調査し、加工送り速度とオフセット量の限界を求める。また、前章ではオフセット量が一定であったため面粗さがわずかにしか変化しなかったが、オフセット量(切り込み量)を変化させた場合において、面粗さがどのように変化するのか比較する。

4.2 実験方法

まず第3章の実験方法と同様にワーク材料としてSKD-11(図3.6)を用い、図4.1に示すように、厚さ10mmのワークを1st Cut加工により加工する。加工条件としては、電気条件E379(表3.1参照)、オフセット131(μm)、最適送りで加工した。形状は図4.2に示すように、凸の高さ0.1mm、縦10mm、横2mmの加工を行い、20個同じものを準備した。1st Cut加工後インジケータ(図4.4参照)を使用し凸形状の高さが寸法どおり0.1mmに加工されているのかを確認し、凸形状の上面だけを2nd Cut加工で直線加工する。加工条件としては、電気条件E1065(表3.2参照)、切り込み量0~100(μm)、加工送り速度は定速送り(F=2~20)を使用し、加工ワーク一つにつき切り込み量は一定で、個々の凸形状ごとに加工送り速度を変化させる。

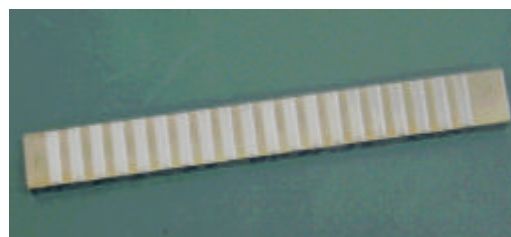


図4.1 SKDの凹凸加工

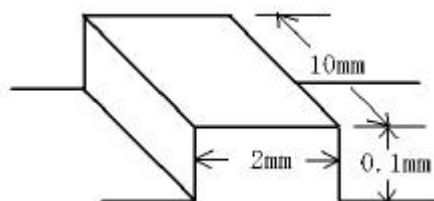


図4.2 図4.1の凸の拡大

切り込み量については、図(4.3参照)で示しているとおり、ワイヤ1の状態では端面をとり、そこから切り込む量だけ移動させた状態が、ワイヤ2である。よってこの状態が2nd Cut加工時の切り込み量となる。今回オフセット量を切り込み量として考え、インジケータを使い加工された後の凸形状の高さを測定し、0.1mmからいくら除去されているのかを計測する。面粗さの測定については第3章の実験方法と同様であるが、測定方向は加工中ワイヤが進行した方向と直角な方向で測定する。

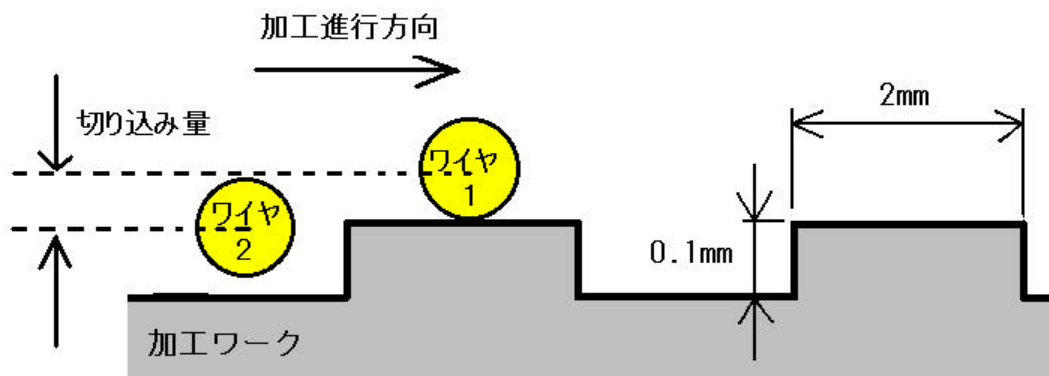


図 4.3 2nd Cut 加工の直線加工図

テストインジゲータ / Tastatore (図 4.4)

目量	0.002mm
測定範囲	0.6mm
広範囲行き精度	3.9 μ m
隣接誤差	1.2 μ m
戻り誤差	1.7 μ m



図 4.4 テストインジゲータ

4.3 実験結果および考察

4.3.1 切り込み量に対する面粗さ結果

加工条件一定のまま、加工送り速度(F=2~20)と切り込み量(0~100 μ m)を変化させ、セカンドカット(2nd)加工を行った。加工面粗さを面粗さ測定器で測定し、結果を表4.1に示した。

表4.1 セカンドカット(2nd)加工における切り込み量に対する面粗さ

加工送り 速度 [mm/min]	切り込 み量 (μ m)	Ra (μ m)	Ry (μ m)	Rz (μ m)	加工送り 速度 [mm/min]	切り込 み量 (μ m)	Ra (μ m)	Ry (μ m)	Rz (μ m)
F=2	0	1.61	9.41	7.35	F=4	0	1.65	9.82	7.78
	10	2.15	13.18	10.24		10	2.36	13.57	10.71
	20	2.31	14.36	10.87		20	2.49	15.23	11.93
	30	3.04	17.55	13.35		30	2.73	15.11	11.53
	40	2.76	15.67	11.11		40	2.91	16.26	12.25
	50	2.64	15.07	12.16		50	2.65	16.05	11.87
	60	3.02	16.06	12.48		60	3.13	16.15	11.95
	70	2.78	16.07	12.10		70	2.98	16.58	12.82
	80	2.61	14.00	11.41		80	2.74	16.44	12.16
	90	2.74	15.34	11.99		90	2.8	15.28	12.01
	100	2.62	14.95	11.54		100	2.74	15.55	11.53
F=6	0	1.67	9.38	7.31	F=8	0	1.79	10.98	7.60
	10	2.23	14.66	10.84		10	2.29	13.41	10.19
	20	2.57	14.65	11.69		20	3.08	15.83	13.00
	30	3.03	16.12	12.41		30	2.76	15.34	11.99
	40	3.06	16.07	13.02		40	3.00	16.89	12.87
	50	2.73	15.56	11.92		50	3.25	17.74	13.68
	60	3.08	15.75	12.51		60	2.95	17.24	12.81
	70	3.19	16.64	13.20		70	2.93	15.16	12.51
	80	2.69	14.55	11.53					
F=10	0	1.68	9.76	7.52	F=12	0	1.82	10.27	8.03
	10	2.35	14.04	10.87		10	2.43	14.17	11.45
	20	2.59	15.39	11.83		20	2.53	15.19	11.53

	30	2.98	16.71	13.42		30	2.90	15.72	12.13
	40	3.06	15.89	12.76		40	2.98	15.70	12.19
	50	2.63	16.00	12.11		50	3.22	16.44	13.40
	60	2.92	15.89	12.49					
F=14	0	1.71	10.29	7.77	F=16	0	1.81	10.59	7.74
	10	2.13	13.10	10.23		10	2.22	13.38	9.99
	20	2.70	15.18	11.91		20	2.59	15.38	11.66
	30	3.21	16.14	13.38		30	2.88	16.62	12.51
	40	3.18	17.05	13.66		40	2.84	16.26	12.81
F=18	0	1.89	9.96	8.00	F=20	0	1.98	11.03	8.09
	10	2.17	13.08	9.68		10	2.25	12.76	10.07
	20	2.57	15.44	11.60		20	2.74	16.00	11.72
	30	3.11	17.57	13.82		30	3.02	16.47	12.86
	40	2.91	16.52	12.26					

4.3.2 切り込み量と加工面粗さの関係

加工送り速度をパラメータとし、切り込み量に対する面粗さの変化を表 4.1 より Ra、Ry、Rz ごとにグラフ化しそれを図 4.5、4.6、4.7 に示した。

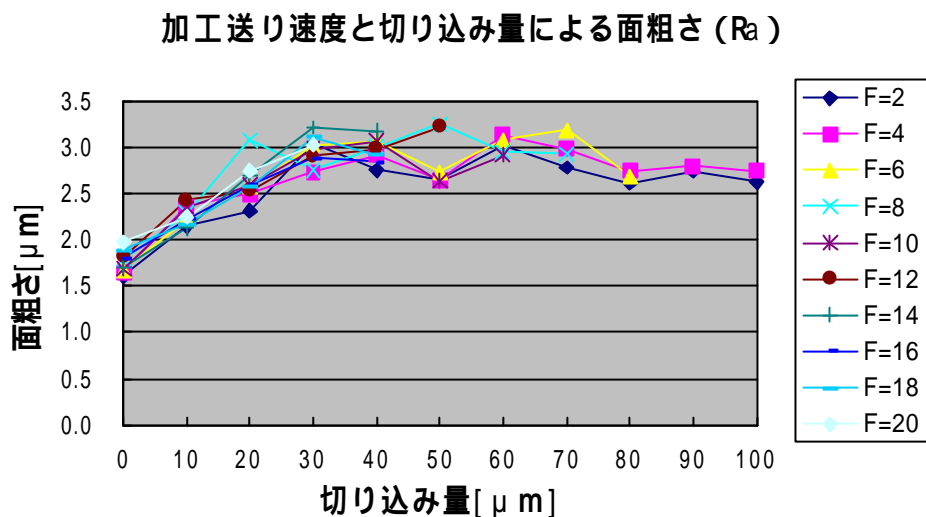


図 4.5 加工送り速度による除去面粗さ (Ra) の変化

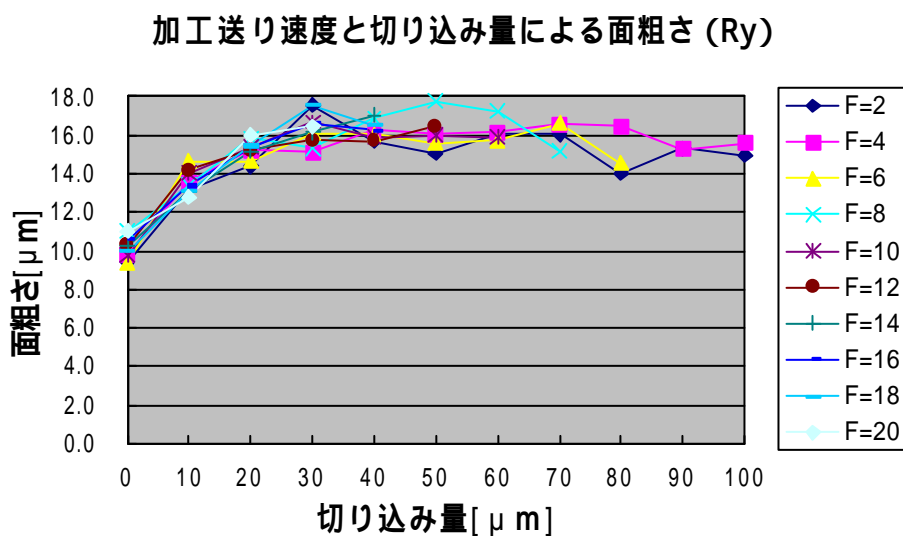


図 4.6 加工送り速度による除去面粗さ (Ry) の変化

加工送り速度と切り込み量による面粗さ (Rz)

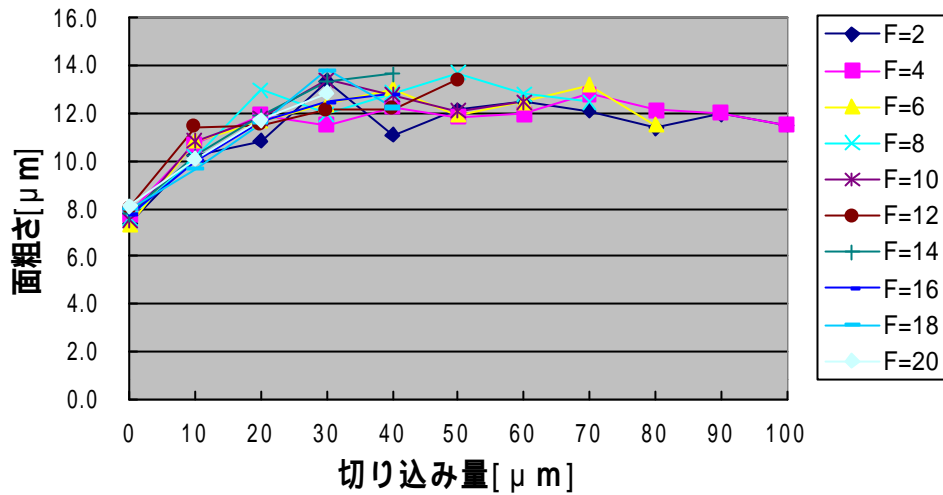


図 4.7 加工送り速度による除去面粗さ (Rz) の変化

今回の実験も加工送り速度に対する面粗さの変化は見られなかったが、切り込み量が深くなるにつれて面粗さが粗くなる傾向が 0~30 μm の間で見られ、30 μm 以上の切り込み量からは面粗さの変化が見られないことが分かった。

セカンドカット加工では 30 μm 以上から 100 μm までの切り込み量の範囲では面粗さの変化は見られないが、0~10 μm の範囲では面粗さの粗くない結果が得られた。考えられることは放電痕、放電クリアランス、切り込み量(オフセット値)のバランスが 0~10 μm の範囲で取れたものと思われる。

切り込み量を少なくして加工を行なった場合は、切り込み量の多い加工に比べて良い面粗さが得られることが分かった。セカンドカット加工においては加工送り速度を速くし、従来どおり一回のセカンドカットで 3rd Cut に移るのではなく、セカンドカットを数回行うほうが、次の段階に移りやすく、加工精度も上げることが可能ではないかと考える。

4.3.3 加工送り速度と切り込み量による除去厚さ結果

切り込み量に対し加工送り速度を変化させた時の除去厚さの結果を表 4.2 に表した。

表 4.2 加工送り速度(F = 2~20)と切り込み量に対する除去厚さの変化表

		加工送り速度 [mm/min]									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
切り込み量 [μm]	0	12	11	10	9.5	9.5	9	9	8.5	8.5	8
	10	15	15	15	14	14	14	13	13	12	12
	20	18	18	17	17	17	16	16	16	16	14
	30	28	28	26	26	25	25	24	23	22	22
	40	38	36	35	35	32	28	28	27	26	
	50	44	44	43	42	41	38				
	60	51	50	47	45	43					
	70	61	59	55	53						
	80	78	76	70							
	90	88	84								
	100	98	94								

4.3.4 切り込み量と除去厚さの関係

表 4.2 を加工送り速度をパラメータとし、切り込み量に対する除去厚さの変化を図 4.8 に示す。

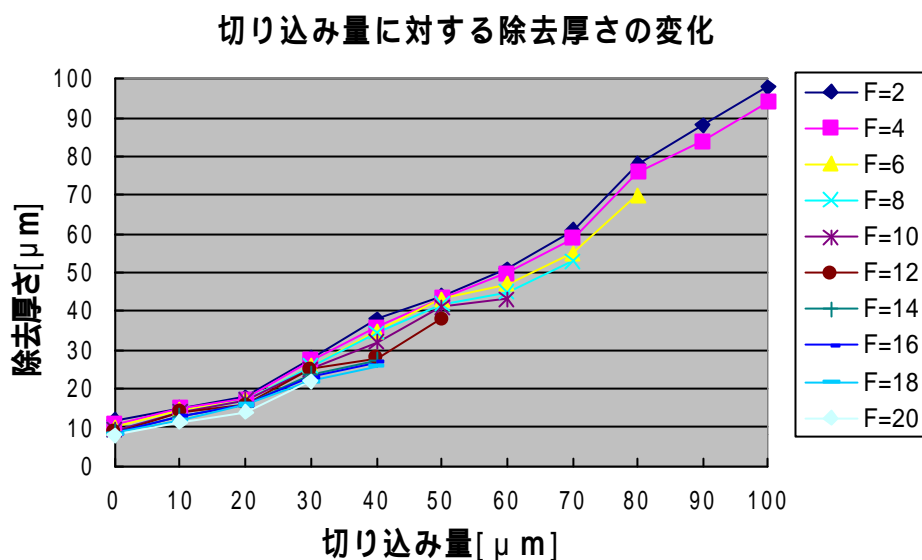


図 4.8 加工送り速度と切り込み量に対する除去厚さの変化

図 4.8 より切り込み量の増加によって除去厚さが比例的に増加していることが分かる。また、わずかではあるが加工送り速度があがるにつれて除去厚さが減少している。

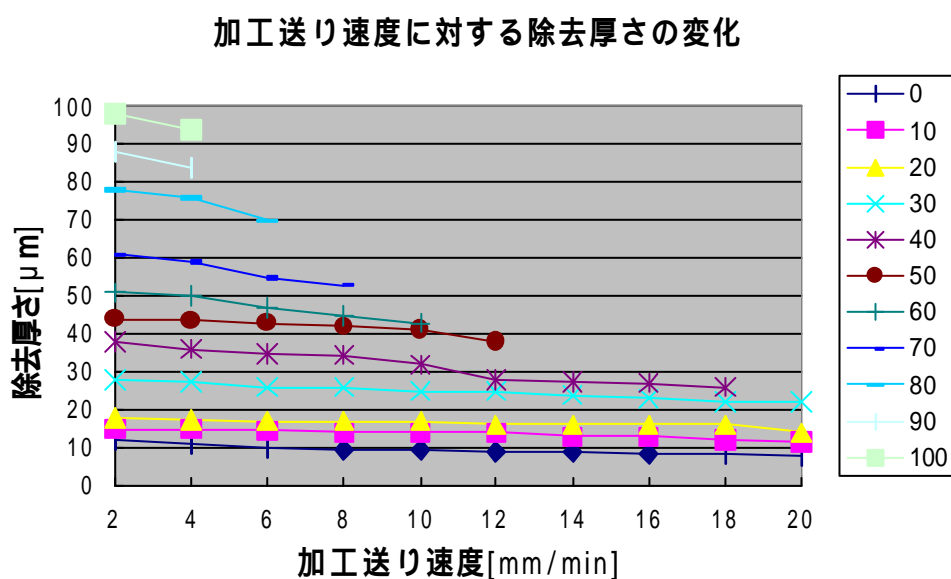


図 4.9 加工送り速度に対する除去厚さ

図 4.9 では、切り込み量をパラメータとして、加工送り速度と除去厚さの関係をグラフ化したものである。同じ切り込み量においては加工送り速度が上がるにつれて、除去厚さが少なくなっていくことが分かる。しかし、加工送り速度の変化が及ぼす除去厚さへの影響は非常に小さい。このことにより、加工の効率を考えた場合、除去厚さは少なくなるものの、加工送り速度は速くした方が良いことが考えられる。

以上の結果より、除去厚さは、加工送り速度が上がるにつれて、指定した目的の切り込み量より少なくなり、逆に取り残す部分が増え、また、切り込み量に注目して除去厚さを見た場合、その値の増加と共に除去厚さの割合は減少し、何より加工可能な送り速度が限られてくることが分かった。

面粗さにおいては、切り込み量が $0\sim 10\mu\text{m}$ の場合、 $20\sim 100\mu\text{m}$ よりも細かい面が得られる結果となった。これより、セカンドカット加工においては、切り込み量は少なく、加工送り速度の速い条件が適していると考えられる。

4.3.5 セカンドカット(2nd) 加工の除去厚さ式

図 4.8 では加工送り速度と切り込み量に対する除去厚さを示したが、図 4.9 では単位時間辺りの除去量で関係を見る。

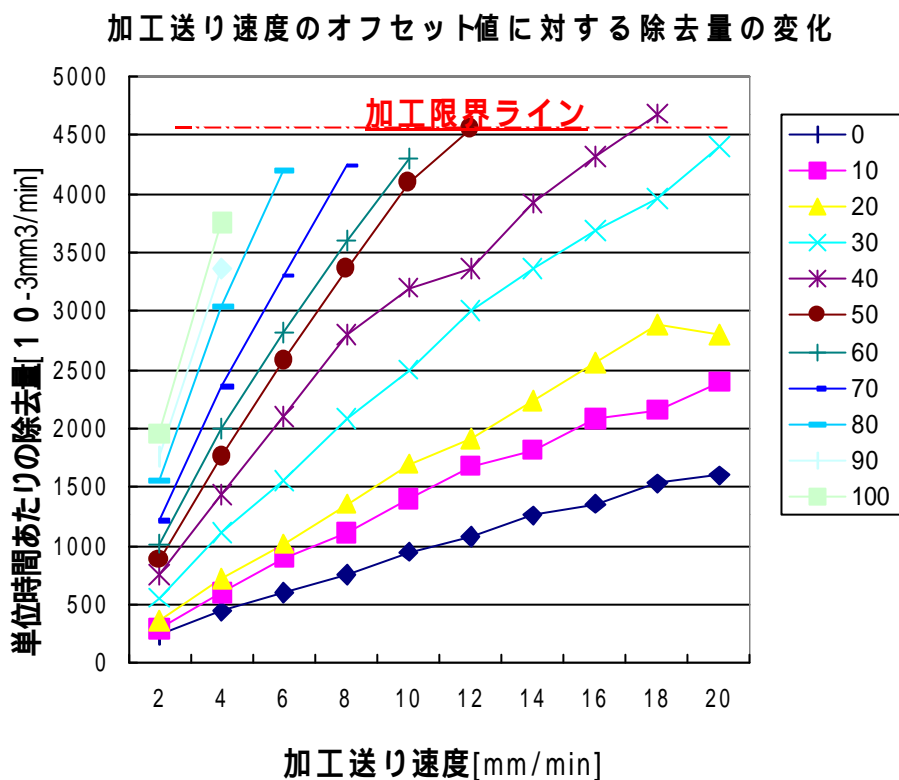


図 4.10 オフセット値に対する単位時間あたりの除去量

図 4.8 は除去厚さを示した図であったが、図 4.10 ではワイヤの単位時間あたりの除去量、つまり体積量を表した。結果 4000 ~ 4500 [$10^{-3}\text{mm}^3/\text{min}$]あたりに、切り込み量に対する加工送り速度の限界が見えてきた。切り込み量 0 ~ 20 μm での範囲では、加工送り限界速度がみえていないが予測では 3500 ~ 4500 [$10^{-3}\text{mm}^3/\text{min}$]の間に収まるのではないかと考える。この結果と予測をもとに加工送り速度と切り込み量(オフセット量)の関係式を立ててみる。

最適除去厚さ

加工送り速度を F [mm/min]、除去厚さを d [mm]、板厚を t [mm] とおくと下記の式が成り立つことがわかる。

$$F \cdot d \cdot t \approx 4500 \times 10^{-3} \quad (1)$$

今回、S K D - 11 を使い板厚 $t = 10$ [mm]、最適値を 80% とおいた場合には (2) のような式になる。

$$F_{\text{opt}} \cdot d_{\text{opt}} \approx 450 \times 10^{-3} \times 0.8 = 0.36 \quad (2)$$

最適値を 80% とおいた理由としては、図 6.3 のグラフを見てみると $3500 \sim 4000$ [$10^{-3} \text{mm}^3/\text{min}$] 辺りが安定して加工できる実用範囲、つまり加工限界ラインの 8 割に相当すると仮定して 80% とおいた。

$$d_{\text{opt}} = \frac{0.36}{F_{\text{opt}}} \quad (3)$$

この式(3)より、加工送り速度を決めることによって、それに対する最適除去厚さ d [mm] が求めることができた。このことによりセカンドカット加工による加工特性が徐々に見え出してきた。これをもとに 3rd、4th Cut の最適除去厚さを求めていけばこのデータをもとに仕上げ段階のさらなる最適化は十分に期待できる。

4.3.6 ワイヤのたわみ量の推定

セカンドカット加工では、目的の切り込み量に対して除去される量が小さくなる。この原因のひとつとしては、加工面に対して垂直方向にワイヤが放電圧力を受け、たわみが生じたためであると考えられる。ワイヤのたわみが発生していると仮定したならば、各切り込み量によるワイヤのたわみ量は、以下の式より表 4.3 に求められたとおりとなる。

ワイヤのたわみ量は以下の式により、求めることができる。

$$\text{ワイヤのたわみ量} = \text{除去厚さ} - \text{切り込み量}$$

表 4.3 ワイヤのたわみ量

	加工送り速度[mm/min]										
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
切り込み量[μm]	0	12	11	10	9.5	9.5	9	9	8.5	8.5	8
	10	5	5	5	4	4	4	3	3	2	2
	20	-2	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-4	-6
	30	-2	-2	-4	-4	-5	-5	-6	-7	-8	-8
	40	-2	-4	-5	-5	-8	-12	-12	-13	-14	
	50	-6	-6	-7	-8	-9	-12				
	60	-9	-10	-3	-15	-17					
	70	-9	-11	-15	-17						
	80	-2	-4	-10							
	90	-2	-6								
	100	-2	-6								

ワイヤのたわみを表 4.3 に表し、図 4.11 に加工送り速度別に見た切り込み量によるワイヤのたわみ量をグラフ化した。

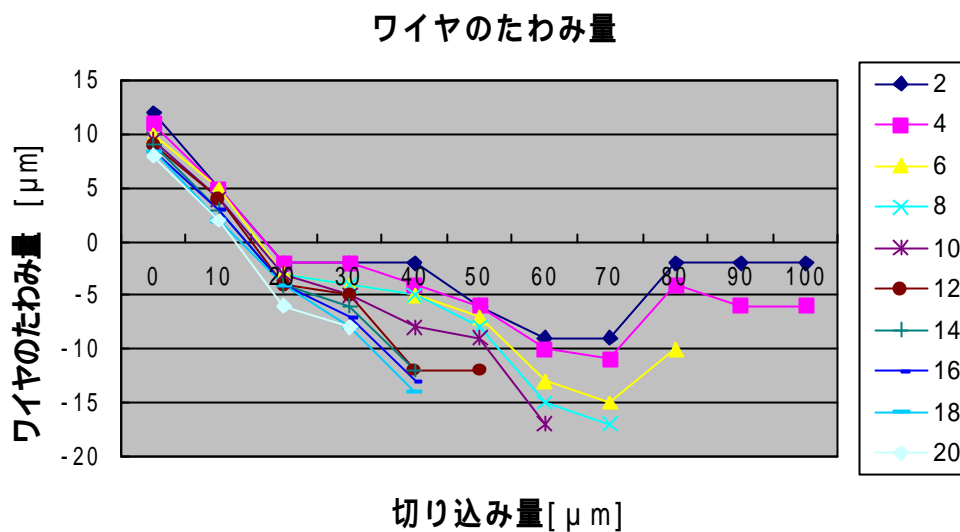


図 4.11 加工送り速度別に見た切り込み量によるワイヤのたわみ量

図 4.11 は、指定した切り込み量よりも深く除去された時をプラスとおき、除去されなかった量をマイナスとみたグラフである。

加工送り速度をパラメータとし、切り込み量に対するワイヤのたわみを見た場合、切り込み量 15 μm 付近が最も指定した切り込み量を除去していることが分かる。また、ワイヤのたわみ量が -15 μm の付近に加工送り速度と切り込み量の限界が表れている。

以下に、ワイヤの各たわみ量時にどれだけの圧力がかかるのかを求めた。

ワイヤのたわみ量の算出式

$$\tan q = \frac{f}{d}$$

$$f = T \sin q$$

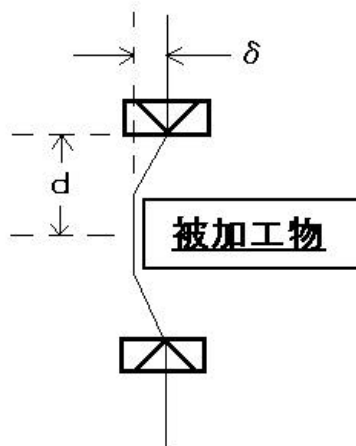


図 4.12 ワイヤのたわみ

図 4.11 より各加工送り速度とも切り込み量が大きくなるにつれてワイヤのたわむ量が大きくなっていくことがわかる。また切り込み量に対する加工送り速度の限界を見ても、たわみ量 15 μ m の周辺で止まっていることがわかる。ワイヤのたわみ量から被加工物よりうける放電圧力を表 4.4 にまとめた。

15 μ m たわむ場合に 1.73 g の圧力が発生し、これ以上の圧力がワイヤに働いた場合、短絡が発生するのではないかと考えられる。

加工精度は、セカンドカット加工においてワイヤのたわみ量が大きいほど悪くなることは明らかであるため、ワイヤのたわみ量が小さくすることによって精度を向上させることができる。

ワイヤのたわみを抑えるにはワイヤテンションを強くする。もしくは電気条件を低くして放電圧力を抑える条件が重要であるが、(3rd、4th Cut...)加工がこれに値するため、セカンドカットの今後の課題としては切り込み量(オフセット値)に対してワイヤテンションがどこまで強くできるかにあると考える。

表 4.4 ワイヤのたわみ量

ワイヤのたわみ量 ()	放電圧力 (f)
-2	0.23
-3	0.35
-4	0.46
-6	0.69
-8	0.92
-12	1.38
-13	1.5
-14	1.62
-15	1.73
-17	1.96

第 5 章 結言

ワイヤカット放電加工機での加工には、荒加工で終わるファーストカット(1st)と、仕上げ加工段階(2nd, 3rd, 4th)まで行うセカンドカット加工がある。セカンドカット加工は、仕上げ面粗さや形状、寸法精度などに効果を持ち、ワイヤカット放電加工機の仕上げ加工として広く普及している。

筆者は、ワイヤカット放電加工機の加工精度向上をテーマに、セカンドカット加工における加工特性について研究を進めてきた。そのなかでも、セカンドカット(2nd)加工法に重点をおいて研究を進め、加工条件と加工精度の関係を導き出し、仕上げ加工段階の見直しと共に、最適化を目的とした。

第 3 章では、セカンドカットにおける面粗さについて調査実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) オフセット量を一定とした場合、加工送り速度が速くなるにつれてわずかではあるが面粗さが粗くなるのは短絡現象が原因である。
- (2) 切り込み量(オフセット量)が大きくなるにつれて面粗さは粗くなっていくが、30 μm 以上の切り込み量からは面粗さは大きく変化しない。
- (3) セカンドカット加工においては切り込み量(オフセット量)を小さくとり、加工送り速度をあげて加工することが適している。

セカンドカットにおける面粗さの調査実験では、オフセット量一定の場合、加工送り速度に変化を与えても面粗さは変化しないと言われているが、わずかに面粗さが粗くなる傾向がみられた。この原因は第 3 章の考察のとおりである。

また、切り込み量(オフセット値)と加工送り速度を変化させて加工を行った場合では、面粗さは切り込み量が大きくなるにつれて粗くなる結果となった。加工送り速度の変化に対する面粗さの変化はわずかであることと、切り込み量を小さくとした場合、面粗さの細かい面を加工できるという結果を得たことによって加工送り速度を速くし、切り込み量を小さくすることがセカンドカット(2nd)加工においては適していることが考えられる。

第 4 章では、設定した切り込み量(オフセット量)を除去できているのかを実験し、以下の結論を得た。

- (1) 加工送り速度を F [mm/min]、除去厚さを d [mm]、板厚を t [mm] とおくと下記の式が得られた。

$$d_{\text{opt}} = \frac{0.36}{F_{\text{opt}}}$$

切り込み量と加工送り速度を変化させて加工除去厚さを求める研究では、加工送り速度と切り込み量に対する単位時間辺りの除去量の関係式を求めることができ、加工送り速度

F_{opt} [mm/min]を決めることによって最適な除去厚さ a_{opt} [mm]が求まる式を導きだせたことが本研究の成果である。

また、同じ切り込み量において加工送り速度の上昇と共に、除去厚さが少なくなっていくことがわかった。しかし加工送り速度の変化が及ぼす除去厚さへの影響は非常に小さいものであるため、加工の効率を考えた場合、除去厚さは少なくなるものの、加工送り速度は速くした方がよいことがわかる。セカンドカット加工では切り込み量が小さい時、加工送り速度をあげても面粗さを細かくすることが可能であるため、3rd Cut 加工でも切り込み量は小さくてすみ、加工送り速度を上げることができると予想されるため、加工時間は短縮されることが十分予想される。今後、研究の幅を 3rd、4th Cut 加工に広めた場合、仕上げ加工全体の時間短縮は大いに期待できると考えられる。

次に、加工送り速度が速くなるにつれて除去厚さが減少するのは、放電圧力によってワイヤが加工面に対してたわみが生じたためであると推定し、研究を進めた結果 1.73 g 程度以上の力がワイヤに働いた場合に、短絡が発生することが求められた。ワイヤのたわみ改善には、第一にワイヤテンションを強くすることが挙げられるが、ワイヤの断線を引き起こしやすくなる。

今後の課題としては、得られた式を元にワイヤテンションの最適値を求め、セカンドカット加工のさらなる精度向上にむけ、板厚や被加工物の変化においても対応していく必要がある。

謝辞

本卒業研究及び研究論文は、小林和彦教授のご指導により完成することに至りました。
終始ご指導いただいた同教授には厚く御礼申し上げます。
また本研究に関し、数々のご協力を頂いた橋本高志氏には深く感謝しております。

参考文献

斎藤長男 小林和彦 仙北谷英次
「ワイヤカット放電加工技術」 (1971)

三菱電機(株) / 斎藤長男
「放電加工のしくみと100%活用法」 (1979)

眞鍋明 葉石雄一郎
「ワイヤ放電加工」 (1997)