

人工骨の生産法

-チタン材料の放電加工特性-

担当指導教員 小林和彦教授

知能機械システム工学科

1 0 1 0 1 1 3

安部 康祐

目次

第 1 章	緒言	1
第 2 章	放電加工について	2
2.1	形彫り放電加工の概要	
2.1.1	放電加工の原理	
2.1.2	加工特性	
2.1.3	加工電源	
2.2	実験に使用したプログラム	
第 3 章	実験方法及び装置	6
3.1	研究に使用する機器	
3.2	実験データ採取項目	
3.3	実験データ測定方法	
第 4 章	パルス幅の変化に伴う加工精度の変化の調査	10
4.1	実験の概要	
4.2	予想される障害への対策	
4.2.1	スラッジによる加工面の精度低下の防止	
4.2.2	電極の偏摩耗による加工面の精度低下の防止	
4.3	実験結果	
4.4	考察	
4.4.1	実験結果の考察	
4.4.2	加工不安定状態とは	
第 5 章	休止時間の変化に伴う加工精度変化の調査	16
5.1	実験の概要	
5.2	実験結果	
5.3	考察	

第 6 章	電極極性の変化に伴う加工精度の変化の調査	2 1
6 . 1	実験の概要	
6 . 2	実験結果	
6 . 3	チタン材料の熱伝導性と加工不安定の関連調査実験	
6 . 3 . 1	実験の概要	
6 . 3 . 2	実験の結果	
第 7 章	全体の考察	2 9
7 . 1	加工特性調査実験のまとめ	
7 . 2	安定した加工ができる条件	
7 . 3	結論	
7 . 4	今後の展望	
第 8 章	結言	3 5
参考文献・資料		3 6
謝辞		3 6
付録		3 7
1 .	レーザー加工機での加工条件	
2 .	チタン材料について	

第1章 緒言

形彫り放電加工機は電極を加工対象物に接近させ、電極の形を投影する加工機である。一般的には切削加工は刃物を使った切削加工機よりも加工時間がかかることもあり、プレス機械の金型などいわば製品の元の元を主に生産しているが、高精度の加工精度を実現する形彫り放電加工機は、ナノマシンの生産などを前提とした超微細加工への応用に向けて研究が進められているなど、同加工機を含め放電加工機は刃物による切削加工機に取って代わる次世代の金属加工機としての新たな地位を築きつつある。

一方で加工が難しいとされるチタンは航空機、船舶、自動車、だけでなく昨今ではテニスラケット、ゴルフクラブ、トレッキング用品など軽量で耐久性が高く要求されるあらゆる分野で利用されるようになり、需要は高まる一方である。

当然それらには同時に高精度が要求されることも多く、高精度での加工が可能な放電加工機はチタン及びチタン合金の加工の有用な手段の一つとしてあげることができる。

その中でも放電加工機における加工分野で最も注目されているのは現在のセラミック製よりも骨成長への対応力・生体適合性・密着性の高いチタン製人工骨の生産である。通常の量産製品の多くは鋳造などで対応でき、またコスト面でも優位であるが、個人によって大きさや形状の異なる骨は完全なオーダーメイドとなるため形彫り放電加工機が優位となる。

人工骨には既に実用化されているものでペースト状のアパタイト素材や生体セラミクスなどがあり、生体適合性や密着性はかなり高い反面、強度に問題がある。一方金属製の人工骨は強度が高いかわりに生体適合性、特に関節に使用した際の摩耗が大きく、同時にその際発生した摩耗粉は人体に有害なものとなる。

しかし、チタン金属やチタン合金をアルカリ水溶液に浸漬した後加熱処理すると、これら金属が、生体活性セラミクスと同様に、生体内でその表面に骨類似アパタイトの層を形成し、それを介して骨と自然に結合するようになることを明らかにし、優れた生体活性と力学的物性を併せ備えた人工骨材料を作製し得る可能性が示された。

しかも、チタンは粘りが強く硬いため従来の刃物による切削での加工は難しいとされるのに対し、放電加工機は熱的效果を利用した加工法であるため、個人差の大きい骨格への対応が可能である。

放電加工機において、より高精度で効率の高い加工を実現するためにはチタン鋼の電気的特性を知ることが必要不可欠となる。

本研究はチタン鋼の効率的かつ高精度な加工を行うことを前提とした、加工特性を調査する基礎実験である。

第2章 放電加工について

2.1 形彫り放電加工機の概要

形彫り放電加工は電極と加工対象物の間に放電現象を起こし加工対象物の表面層を除去する加工法である。

2.1.1 放電加工の原理

加工液中で電極と加工対象物を対応させきわめて小さなギャップを保っている。

電極と加工対象物との距離が数ミクロンまで近づいたとき、まず一番近い地点で放電が起きる。放電による火花はすぐに細いアーク柱となり、きわめて密度の高い電子の流れとなって加工対象物にぶつかる。

電子の流れはそこで融点の高い金属でさえ融解してしまうほどの熱に変わり加工対象物は融解する。同時にその熱によって気化状態となった加工油から発生する大きな圧力によって溶けた金属は加工油中に飛散し、再び加工油が流れ込み冷却と焼き入れ効果を生む。

飛散しきれなかった金属は放電点周囲に付着しクレーター状となり、次の放電のきっかけとなる。

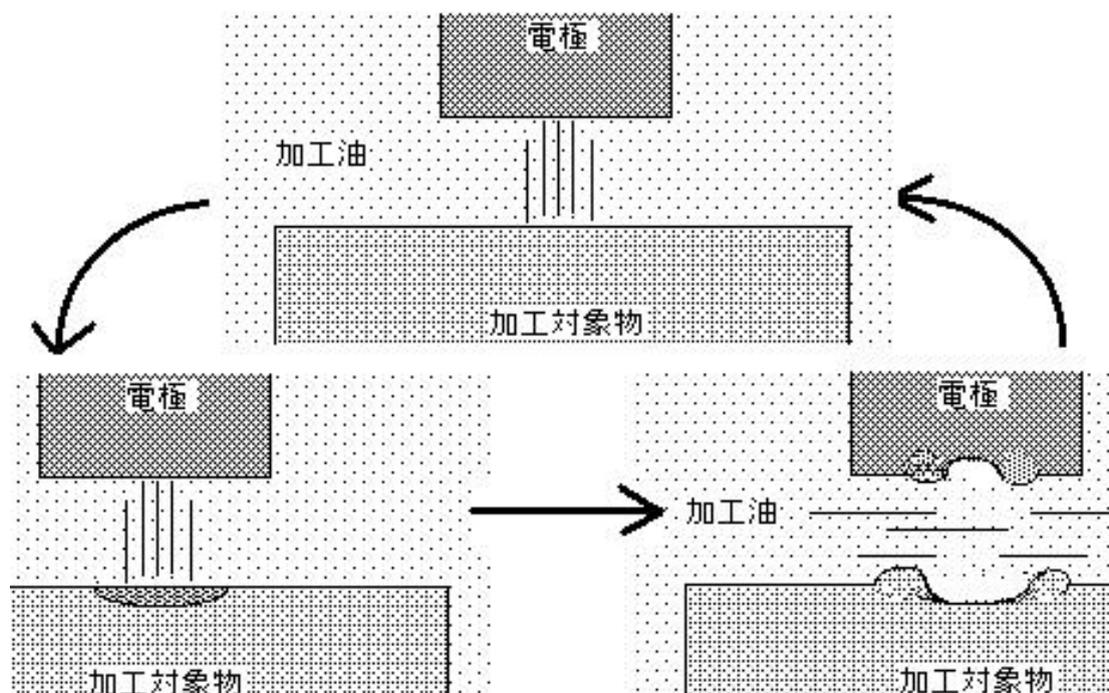


図2.1 放電加工のサイクル

2.1.2 加工特性

放電加工における加工特性は加工速度、仕上げ面荒さ、クリアランス、電極消耗度が挙げられる。

これら加工特性は電流ピーク値(I_p)、パルス幅(p)などの電気条件によって決定づけられ、 I_p 値、 p 値が大きくなるほど加工速度は速くなり、仕上げ面荒さは荒くなる。つまり、加工速度が速ければそれだけ仕上げ面荒さも荒くなる。

このような特性から銅電極対鉄加工物の場合、荒加工で目的の深さ近くまで掘り下げ、仕上げ加工で加工表面を整えるといった電気条件の使い分けを行っている。

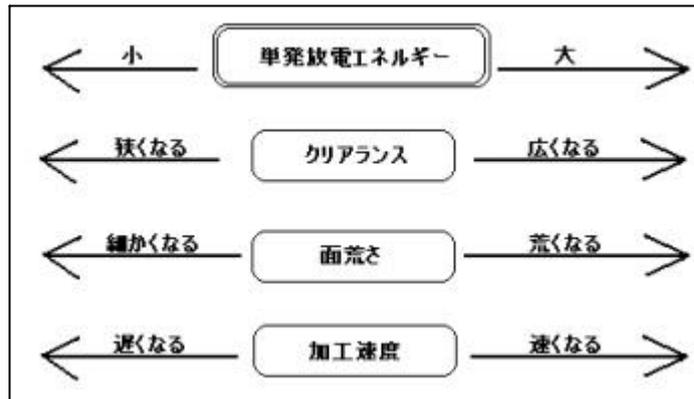


図 2.2 放電加工特性

また、電極極性については - の方が荒加工となり、超硬金属などの加工に向いているとされている。

電極消耗については、パルス幅が大きくなればなるほど、ピーク電流値につ

いては銅電極の場合はピーク電流値が小さくなればなるほど、グラファイト電極はピーク電流値が大きくなればなるほど消耗は小さくなる。従って荒加工の場合はグラファイト電極が有利となる。

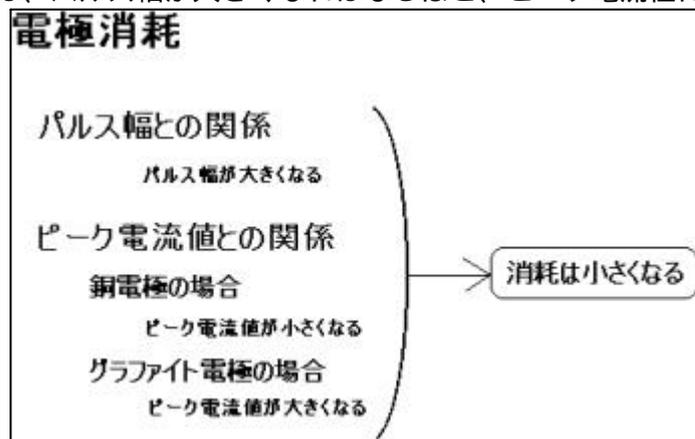


図 2.3 電気条件と電極消耗の関係

2.1.3 加工電源

(1) TP回路

加工電源のベースとなる回路で、荒加工から仕上げ加工まで、あらゆる加工に対応できる汎用性を持った回路である。

パルス幅、休止時間は発振回路によって設定されるが、トランジスタの場合、1秒間に数千から数十万回のパルスを送信するたその時間は数十万分の一から数千万分の一と非常に短いものとなる。

その動作は発信回路がIC化されているため極めて安定している。

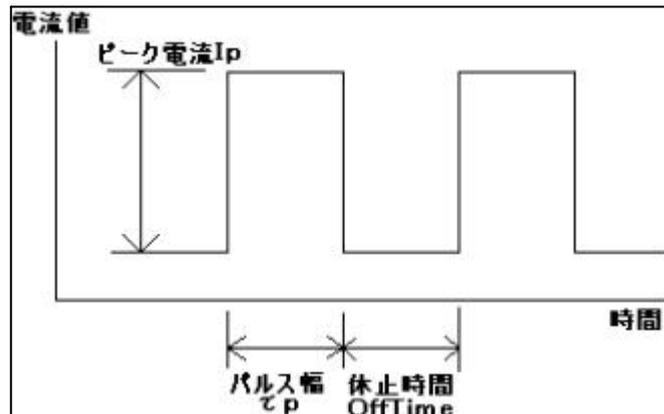


図2.4 電流パルス波形

(2) SC回路

SC回路は荒加工から仕上げ加工までの低消費及び超低消費加工を行う回路で、銅電極対鉄系ワークを加工する場合に有効である。

SC回路においては消費度切り替えが設定要素に加わる。

消費度切り替えとは電流立ち上がりスロープを設定するもので、設定値が大きくなるほどスロープが緩やかになり消費比が少なくなる。

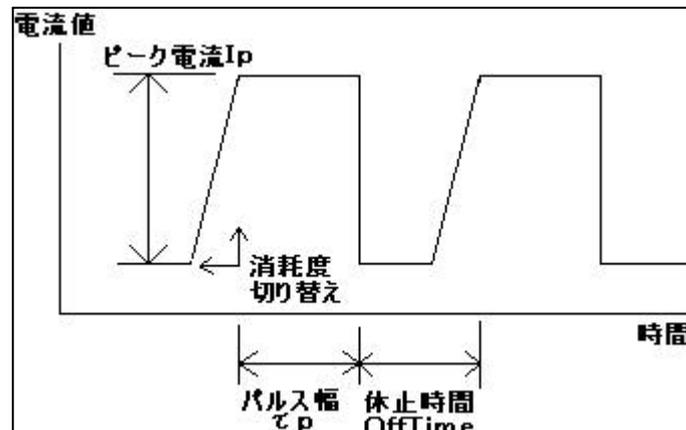


図2.5 パルス波形(SC回路)

2.2 本実験に使用した加工プログラム

L1208	
G90 ;	絶対値指定
M88;	急速充填
M80;	加工液入
M84;	加工入
M68;	加工液噴射入
M69;	加工液噴出入
M03;	C軸回転入
M41;	C軸高速回転
G01 X0.0 Y0.0Z-0.5 ;	Z軸を - 0 . 5 mm掘り下げる
M05;	C軸回転切
M85;	加工切
M72;	加工液噴射切
M73;	加工液噴出切
M81;	加工液切
M89;	加工液排出
%	

第3章 実験方法及び装置

3.1 実験に使用する機器

本研究で使用する機材は以下の通り

(1) 形彫り放電加工機三菱電機社製V X 1 0

最小指令単位 0.1 μm

最小駆動単位 0.1 μm

駆動方式 ACサーボモーター

位置検出方式 ロータリーエンコーダー



図3.1 形彫り放電加工機の外観写真

(2) 12mmの円筒形銅棒電極

中心部に 3mmの穴を貫通させた円筒型電極



図3.2 実験に使用した電極形状

(3) 純チタン材料

(40 × 40 × 3 mmにワイヤカットカット放電加工機にてカットしたものを使用)



図3.3 実験に使用したチタン材料の形状

(4) メトラー・トレド社製AG204天秤

読み取り限度 0.1 mg
最大秤量限度 210 g
再現性 0.1 mg
直線性 ±0.2 mg
200 g 校正分銅内蔵



図3.4 AG天秤の外観

(5) 東京精密製超小型表面荒さ測定器ハンディサーフE-30A

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
測定範囲 160 μ m
パラメータ(JIS)Ra, Rmax, Rz, Rt, Rtm, Rpm, Pc



図3.5 面荒さ測定器の外観

(6) ミットヨ製 測定顕微鏡 TF-501F

形式 支柱直立型
接眼鏡筒 俯角 30°
対物レンズ倍率 $\times 3$ 、 $\times 10$
接眼レンズ倍率 $\times 10$
透過照明装置 反射照明装置



図3.6 測定顕微鏡の外観

3.2 実験データ採取項目

出力電流量(IP)と極性(+または-)、パルス幅(ON - OFF)の変化に伴う
分あたりのチタン材料加工グラム量
分あたりの銅電極消耗比
チタン材料の表面荒さ

3.3 実験データ測定方法

あらかじめ標本符号を与えたチタン鋼ワークと銅電極の重量をAG天秤にて計測し、任意のIPとON - OFFを設定する。同時にワークを加工テーブルに設置後端面を計測し、電極とワークの接点にて各座標を0とする。加工油を充填させ電極を座標(0, 0, 5)に移動し加工をスタートする。

なお、加工プログラムはあらかじめ設定した本体メモリ1208番を利用する。(プログラムは下記参照)

ワーク左上方よりホースによる噴出圧力1.0 Kgf/cm²での加工液噴出(前ページ写真参照)、C軸回転がプログラムに含まれており、本実験共通の設定としている

加工開始から10分後加工を停止しワークと銅電極の油分を除去したのち再びAG天秤にて重量を計測する。(加工前) - (加工後)から求められる重量差より分あたりの加工グラム量および銅電極消耗グラム量を求める。

同様に表面荒さを計測し標本毎に記録する。

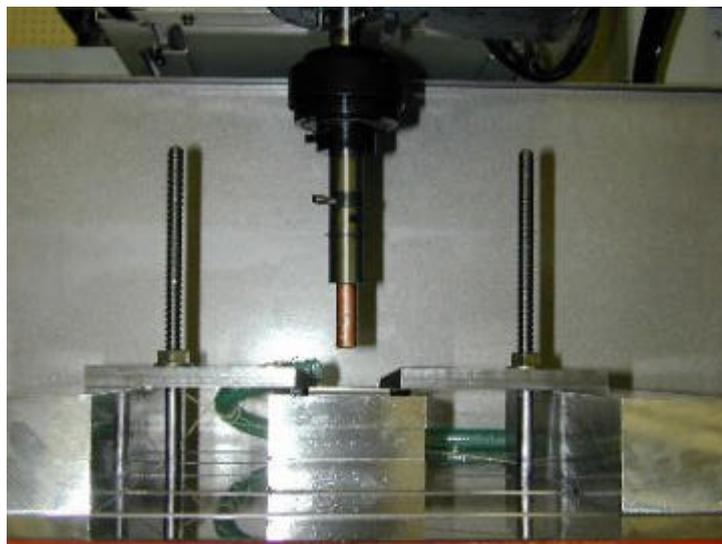


図3.7 加工前の電極とワーク

第4章 パルス幅の変化に伴う加工精度の変化の調査

4.1 実験の概要

本実験ではパルス幅を任意に設定しそれぞれの条件での分あたり加工量、加工表面荒さ、電極摩耗比を測定し、効率の良いと思われるパルス幅を特定する。

ここでは銅電極対鉄加工物の設定を基準にS C回路にてパルス幅と休止時間を同一とし、測定を行った。

4.2 予想される障害への対策

実験開始前よりあらかじめ予想された障害への対策を施した。

4.2.1 スラッジによる加工面の精度低下の防止

加工中、加工液循環だけではスラッジを除去しきれない場合があり、そのような状況ではスラッジによって加工面の精度が低下する可能性がある。

そのため今回は加工面に向けての加工液噴出(1.0 Kg f / c m²)をおこなった。



図4.1 上写真中のホースより加工液を噴出させる

4.2.2 電極の偏摩耗による加工面の精度低下の防止

放電加工機は電極とワークとの距離が一番近いところで放電が起こるため、電極とワークの水平がとり切れていない場合は局所的に放電が続き加工表面の精度の低下や電極の偏摩耗が起こるおそれがある。また、C軸回転を行うことにより効率よくスラッジを除去する事が可能である。

それらに対応するためC軸回転を加工プログラムに入れ電極を回転させながら加工することとした。

4.3 実験結果

実験の結果、以下の通りとなった。

表 4.1 パルス幅を変化させた場合の実験結果

標本番号	5	電流量(I _p 値)	3.5
パルス幅	8	表面荒さ(Ra)	3.6
重量変化(加工前 加工後) g	21.3747		21.3719
標本番号	6	電流量(I _p 値)	3.5
パルス幅	16	表面荒さ(Ra)	4.1
重量変化(加工前 加工後) g	21.0587		20.9544
標本番号	7	電流量(I _p 値)	3.5
パルス幅	32	表面荒さ(Ra)	4.4
重量変化(加工前 加工後) g	24.2589		24.173
標本番号	8	電流量(I _p 値)	3.5
パルス幅	64	表面荒さ(Ra)	5.5
重量変化(加工前 加工後) g	23.7833		23.7254
標本番号	9	電流量(I _p 値)	3.5
パルス幅	128	表面荒さ(Ra)	6.2
重量変化(加工前 加工後) g	23.7418		23.7115
標本番号	10	電流量(I _p 値)	3.5
パルス幅	256	表面荒さ(Ra)	6.4
重量変化(加工前 加工後) g	23.2939		23.1708
標本番号	11	電流量(I _p 値)	3.5
パルス幅	512	表面荒さ(Ra)	6.9
重量変化(加工前 加工後) g	21.245		21.2328

$$I_p 3.5 = 279.5 \text{ mA}$$

パルス幅の単位：m S e c

電極消耗比は以下の通り

表 4 . 2 パルス幅を変化させた場合の電極消耗比

標本番号	電極加工前重量(g)	電極加工後重量(g)	電極消耗比(%)
5	47.7267	47.7265	0.0196
6	47.7867	47.7739	0.019
7	47.7739	47.7577	0.0188
8	47.7269	47.7255	0.0018
9	47.7568	47.7561	0.0014
10	47.7561	47.7553	0.0012
11	47.7553	47.7548	0.001

以上の計測結果を以下のグラフに示した

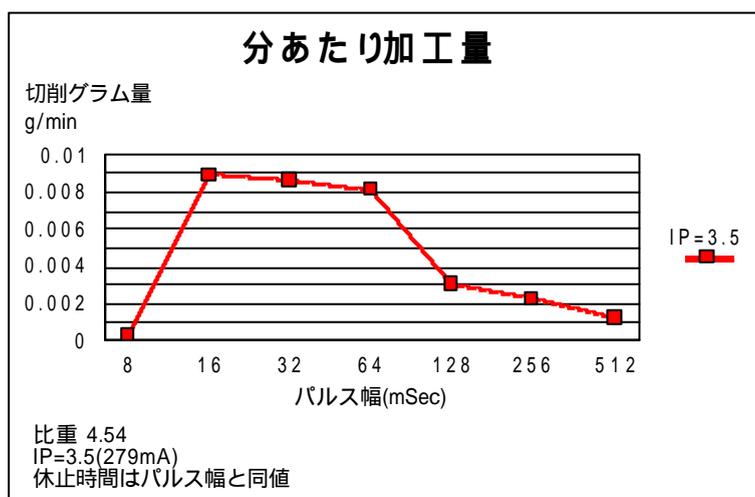


図 4 . 1 パルス幅の変化に伴う分あたり加工量の変化

放電加工の場合、通常はパルス幅の増加とともに加工量も増加するものであるが、今回パルス幅 8 から 16 m S e c にかけて上昇し徐々に下がっていくという結果となった。

当初、計測に誤差が発生しているものと考えたが何度も加工、計測をやり直しても変化はなかった。

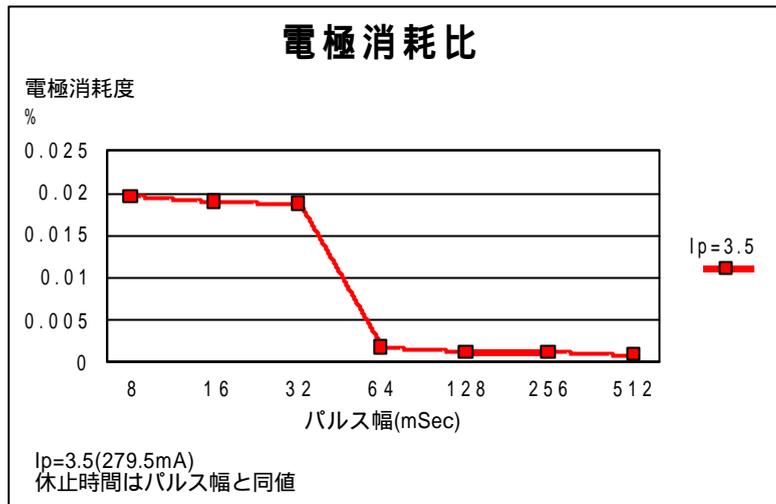


図 4 . 2 パルス幅の変化に伴う電極消耗比の変化

電極消耗比についてはパルス幅の増加に伴い徐々に減少していく結果となり、放電加工特性(3頁 第2章2.1.2放電加工特性参照)に沿った結果となった。パルス幅32から64mSecにかけての急激な消耗比の減少については加工、計測を数回やり直しても変化はなかった。

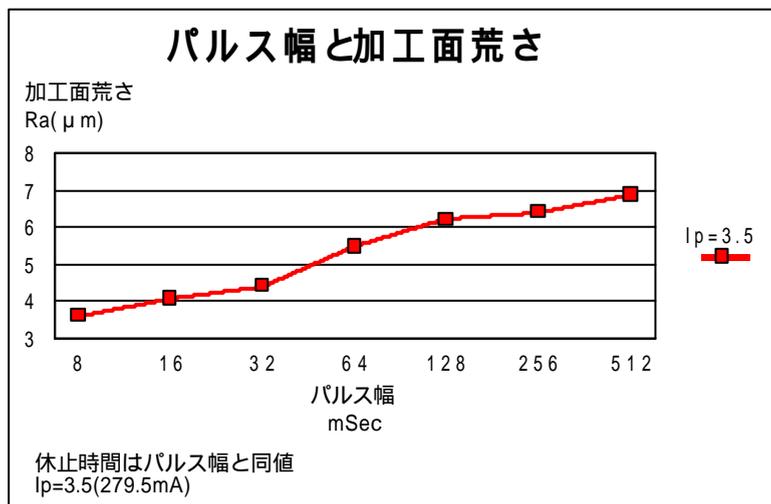


図 4 . 3 パルス幅の変化に伴う加工面荒さの変化

加工面荒さについてはパルス幅の増加に従い荒くなっていく結果となり、また比例直線に近い理想的な計測ができたものとする。

4.4 考察

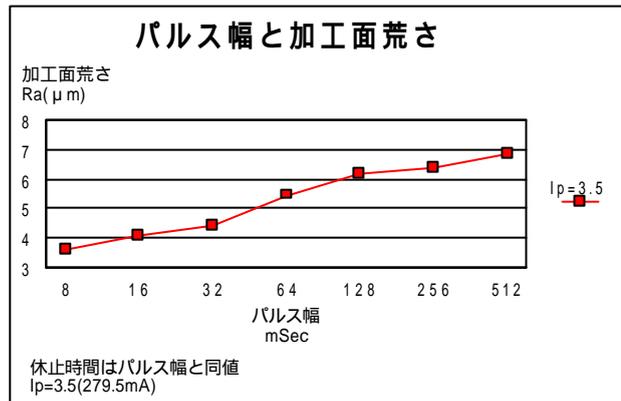
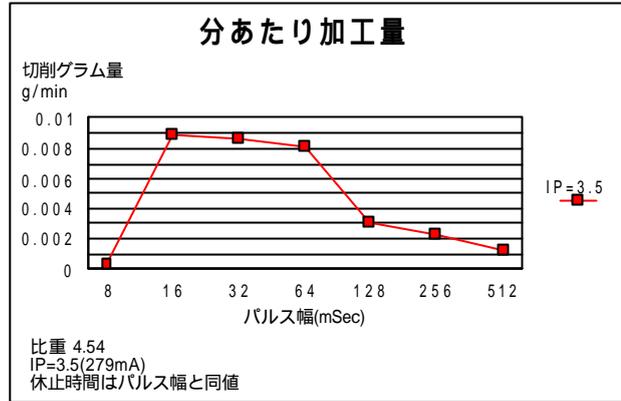
4.4.1 実験結果の考察

実験の結果では、本来パルス幅の増加に伴い徐々に加工量が増加するはずであったものが、パルス幅 16 mSec 以降は減少する結果となった。

理論上はパルス幅が増加すればそれだけ加工物に与えられるエネルギーの量は増え、加工量は増加しなければならない。

これについては当初 4.3 (12頁)に記したように計測でのミスと考え、加工や計測を何度もやり直したが、数値のばらつきはあったもののパルス幅 8 から 16 mSec にかけて増加し、その後減少する事に変化がなく、また加工面荒さが比例直線に近い理想的なグラフとなったことからデータそのものは信憑性の高いものであると考えられる。

今回このような結果となった要因として考えられるのは加工不安定状態が起きた可能性が挙げられる



4.4.2 加工不安定状態とは

加工不安定状態とは加工対象物と電極とのギャップが遠すぎ、本来放電される地点以外で放電が起こってしまう状態で、結果として加工表面が粗くなる、加工量が減少するなどが挙げられる。

加工不安定となる原因としてスラッジを除去しきれないために加工面に残留し本来放電されるべき点よりも電極とのギャップが近くなりスラッジの堆積点に向けて放電が続いてしまうことが挙げられる。

今回の実験ではスラッジへの対策として電極に向けて加工液噴出をおこなったが噴出では対応しきれないことが判明した。

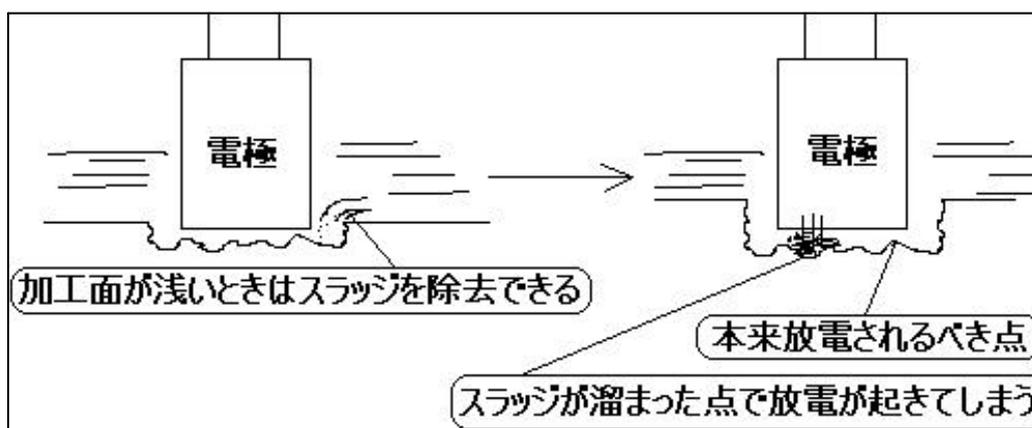


図 4.4 加工不安定状態の原因

加工不安定になりやすい条件はパルス幅が長すぎる、休止時間が短すぎる、スラッジの堆積で加工電圧が不均衡となるなどが挙げられ、本実験ではパルス幅 6.4 mSec 以降はパルス幅が長すぎるものと判断できる。

第5章 休止時間の変化に伴う加工精度の変化の調査

5.1 実験の概要

本実験では第4章での加工量の多かったパルス幅16mSecおよび32mSecで休止時間を変化させ安定して加工できる休止時間を調査する。

第4章同様の流れでピーク電流値、パルス幅を固定し、休止時間を変化させ休止時間の変化が加工にどのような影響を及ぼすか、また休止時間の変化と加工不安定の発生にはどのような関係があるかを調査した。

5.2 実験結果

実験の結果、以下のようになった。

表5.1 パルス幅16mSecでの休止時間を変化させた場合の実験結果

標本番号	12	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	8
分あたり加工量	0.00799	表面荒さ	3.7
標本番号	6	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	16
分あたり加工量	0.00891	表面荒さ	4.1
標本番号	13	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	32
分あたり加工量	0.00895	表面荒さ	4.15
標本番号	14	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	64
分あたり加工量	0.00673	表面荒さ	4.2
標本番号	15	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	128
分あたり加工量	0.00389	表面荒さ	4.2
標本番号	16	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	256
分あたり加工量	0.002	表面荒さ	4.26
標本番号	17	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	512
分あたり加工量	0.00099	表面荒さ	4.28

表 5 . 2 パルス幅 3 2 m S e c での休止時間を変化させた場合の実験結果

標本番号	18	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	8
分あたり加工量	0.00531	表面荒さ	4.084
標本番号	19	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	16
分あたり加工量	0.0067	表面荒さ	4.29
標本番号	7	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	32
分あたり加工量	0.00851	表面荒さ	4.5
標本番号	20	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	64
分あたり加工量	0.0091	表面荒さ	4.6
標本番号	21	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	128
分あたり加工量	0.0067	表面荒さ	5.14
標本番号	22	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	256
分あたり加工量	0.0035	表面荒さ	5.3
標本番号	23	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	512
分あたり加工量	0.00178	表面荒さ	5.22

電流量 3 . 5 = 2 7 9 . 5 m A

パルス幅、休止時間 : m S e c

電極消耗度は以下の結果となった。

表 5 . 3 休止時間を変化させた場合の電極消耗比

標本番号	電極重量変化(g)	電極消耗比(%)
12	0.0234	0.04
6	0.0128	0.038
13	0.0165	0.034
14	0.0038	0.0078
15	0.0046	0.0096
16	0.001	0.002
17	0.001	0.002
18	0.0085	0.0178
19	0.0139	0.029
7	0.0162	0.0188
20	0.0029	0.006
21	0.0026	0.0054
22	0.0026	0.0054
23	0.0024	0.004

以上の結果をグラフに示す。

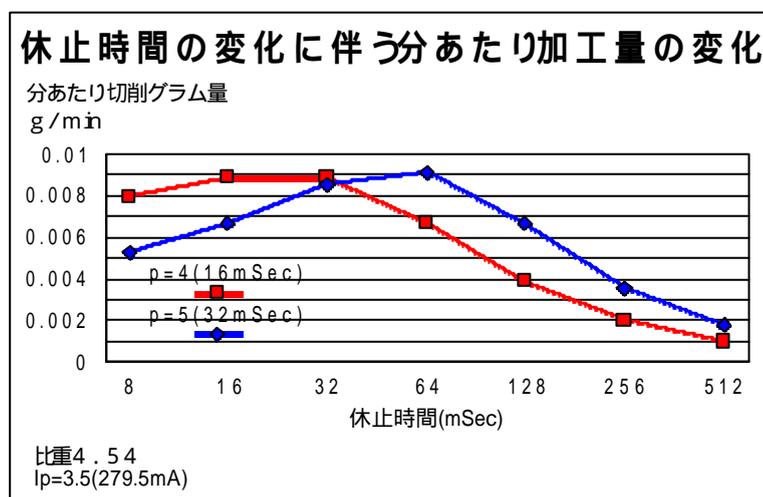


図 5 . 1 休止時間の変化に伴う加工量の変化

加工量は、パルス幅よりも休止時間を少し長く設定した方が加工量が増えることがわかった。通常、休止時間が増加するとそれだけ放電回数が減り、加工量も減少するが、今回の結果はパルス幅より、休止時間が少し長いくらいまでで加工量の増加が見られた。これは、パルス幅より休止時間が短い場合、加工が安定しないということが考えられる。

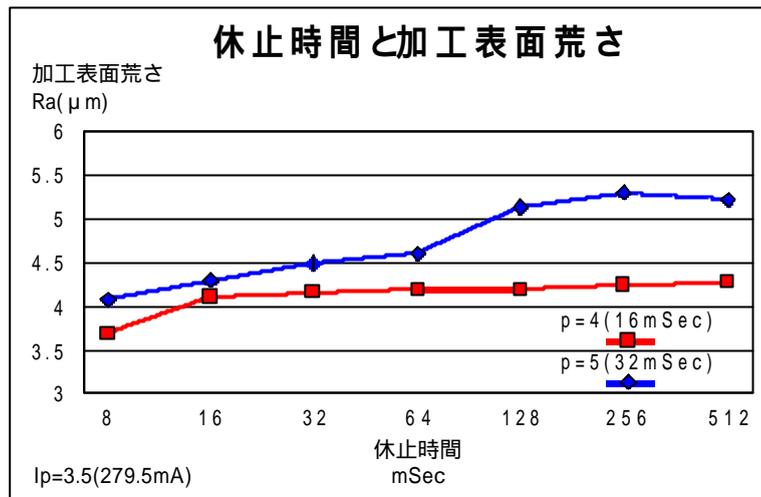


図 5 . 2 休止時間の変化に伴う加工面荒さの変化
加工面荒さについてはほとんど変化はなかった。
通常休止時間が増加するに従って面荒さは増加する傾向があるため、今回の測定結果はそれに沿った計測結果であるといえる。

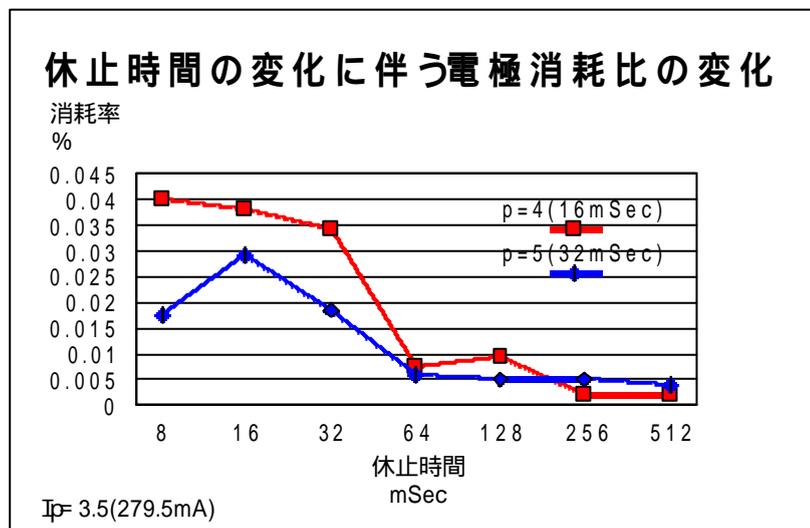


図 5 . 3 休止時間の変化に伴う電極消耗比の変化
電極消耗比においても休止時間の増加とともに消耗比がおおむね減少する結果となった。

5.3 考察

以上の結果より、休止時間は加工量の変化に大きな影響を及ぼしていることがわかった。

特に、通常では休止時間が長いほど放電回数も減少するため、加工量を示す右のグラフは徐々に下がっていくグラフとなるべきであるが、パルス幅 16 m S e c では休止時間 32 m S e c、パルス幅 32 m S e c では 64 m S

e c で最も加工量が多いという結果となったことは休止時間がパルス幅より短い場合は加工不安定となりやすいとすることを示している。

加工不安定状態が起こると加工面に目視できる程度の凹凸が生成され、加工精度が著しく低下する。

また、本実験で最も加工量が多かったパルス幅 32 m S e c 休止時間 64 m S e c の設定で深さ 1 mm で掘り下げをおこなった。その場合、この加工条件においても加工不安定が起き溝が出来上がり、プラス極性電極での加工は実用性に欠けてしまうという結論を得た。

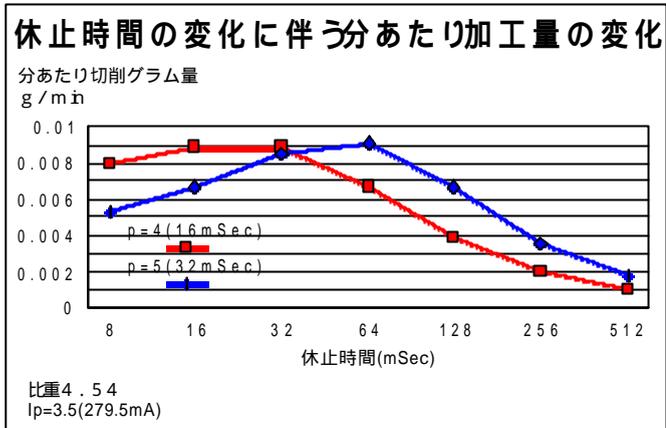


図 5.1 休止時間の変化に伴う加工量の変化



図 5.2 加工不安定状態となったチタン材料

第6章 電極極性の変化に伴う加工精度の変化の調査

6.1 実験の概要

第5章での実験においてプラス電極極性での加工では、深さ1mm以上の加工は安定して加工ができないと言う結論がでたため、本実験では電極の極性をプラスからマイナスに変更し、また加工回路をSC回路から、超硬物の加工に向くとされるTP回路に変更し、加工量が多かったパルス幅16mSecと32mSecで休止時間を变化させて加工量、加工面荒さ、電極消耗度の変化を測定した。

6.2 実験結果

実験の結果以下のようになった

表6.1 マイナス電極極性パルス幅16mSecでの休止時間を变化させた場合の実験結果

標本番号	39	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	8
分あたり加工量	0.00007	表面荒さ	2.21
標本番号	40	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	16
分あたり加工量	0.00008	表面荒さ	2.24
標本番号	41	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	32
分あたり加工量	0.00006	表面荒さ	2.4
標本番号	42	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	64
分あたり加工量	0.00006	表面荒さ	2.07
標本番号	43	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	128
分あたり加工量	0.000065	表面荒さ	2.07
標本番号	44	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	256
分あたり加工量	0.00007	表面荒さ	2.19
標本番号	45	電流量	3.5
パルス幅	16	休止時間	512
分あたり加工量	0.00008	表面荒さ	2.1

表 6 . 2 マイナス電極極性パルス幅 3 2 m S e c での休止時間を変化させた場合の実験結果

標本番号	46	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	8
分あたり加工量	0.00005	表面荒さ	2.62
標本番号	47	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	16
分あたり加工量	0.00006	表面荒さ	2.69
標本番号	48	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	32
分あたり加工量	0.00006	表面荒さ	2.81
標本番号	49	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	64
分あたり加工量	0.00008	表面荒さ	3.05
標本番号	50	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	128
分あたり加工量	0.0001	表面荒さ	2.82
標本番号	51	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	256
分あたり加工量	0.00007	表面荒さ	2.91
標本番号	52	電流量	3.5
パルス幅	32	休止時間	512
分あたり加工量	0.00005	表面荒さ	2.93

パルス幅、休止時間の単位 : m S e c

表6.3 マイナス電極極性での電極消耗比

標本番号	電極重量変化(g)	電極消耗比(%)
39	0.000094	0.0002
40	0.000091	0.0002
41	0.00009	0.0002
42	0.0002	0.0004
43	0.00023	0.0005
44	0.00033	0.0007
45	0.000379	0.0008
46	0.00005	0.00011
47	0.000047	0.0001
48	0.00005	0.00011
49	0.000061	0.00013
50	0.000047	0.0001
51	0.000091	0.0002
52	0.00018	0.0004

電極消耗比 = (電極重量差) ÷ (加工前電極重量)

なお、上記計測結果は4回の加工、計測の平均値である。

以上の結果をグラフに示す。

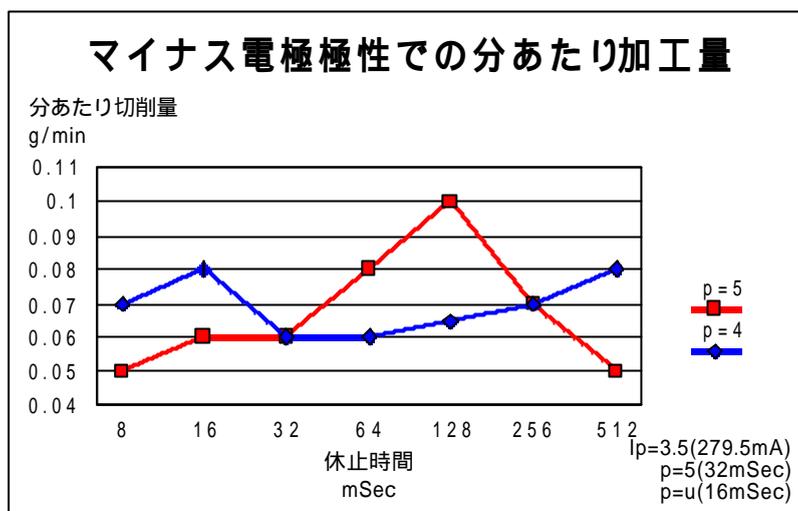


図 6 . 1 マイナス電極極性での休止時間の変化に伴う加工量の変化

加工量については第 5 章で示されたようにパルス幅より休止時間が長い設定の方が加工量が増える結果となった。

これは、電極極性をマイナスに変更しても休止時間を長めに設定した方が加工は比較的安定しやすい傾向があることが示されているといえる。

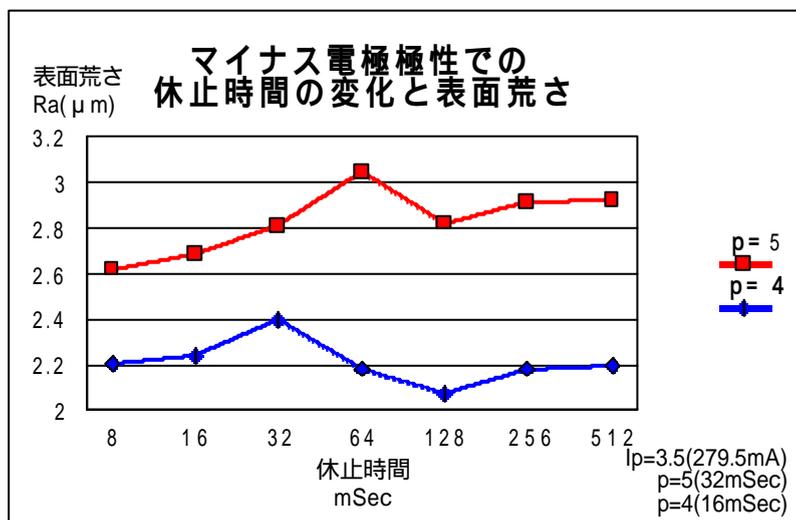


図 6 . 2 マイナス電極極性での休止時間の変化に伴う加工表面荒さ

加工面荒さについては、パルス幅 32 mSec ($p = 5$)では、休止時間の増加に伴っておおむね上昇しているのに対し、パルス幅 16 mSec ($p = 4$)では休止時間 32 mSec を頂点にむしろ減少の傾向が見られた。

これについては、休止時間 8 mSec から 64 mSec にかけて加工不安定状態が起きていると考えた。

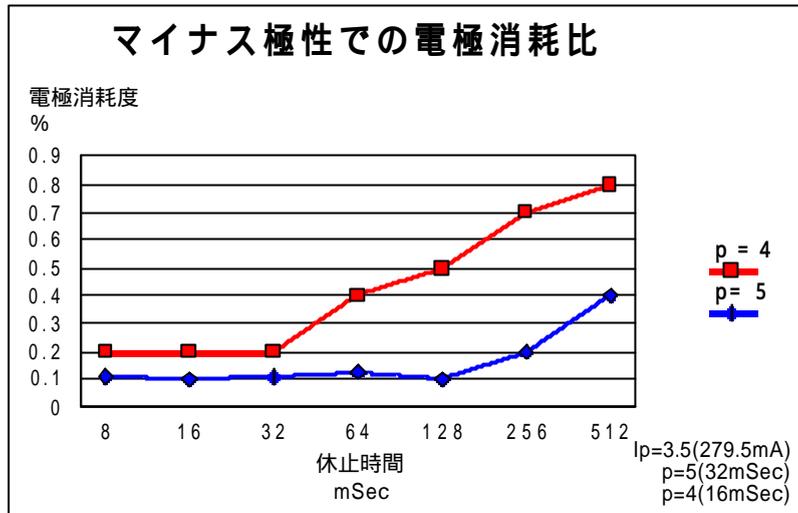


図 6 . 3 マイナス電極極性での休止時間の変化に伴う電極消耗比の変化

パルス幅と電極消耗比の関係については、第 1 章に記述したとおり通常はパルス幅の増加に従い電極消耗比も減少するとされ、本実験ではそれを示す結果となったものの、休止時間と電極消耗比の関係では、本来休止時間の増加に伴い消耗度は下がるべきところ、休止時間が増加するのに伴って電極消耗比も増加するという結果となった。

これについては、当初加工不安定状態が起きていると考えたが、休止時間の増加に従い、パルス幅 16 mSec、32 mSec ともおおむね上昇が見られることからその可能性は低いと考えられる。

なお、第 4 章の本実験では各設定条件の下最低 4 回の加工、測定をおこない、平均値を示したものだが、個別の結果においてもこのような結果となった。

これについては、チタン材料の熱伝導性が他の金属と比較して極端に低い性質が要因となっていると考え、放電加工機とは異なり、連続して加熱することができる同じく放電による熱的效果を利用した、レーザー加工機によるチタン材料の加熱実験をおこなった。

6.3 チタン材料の熱伝導性と加工不安定の関連調査実験

6.3.1 実験の概要

加工量の変化を示す前項グラフ中パルス幅16mSecでは休止時間が増加するに従い加工量も増加していた。チタン鋼は粘りが強いいため、また熱伝導率が他の金属と比べ極端に低いため、加工開始直後にエネルギーを与え過ぎると大きな範囲で溶解が起こり、放電で与えたエネルギー以上に加工された可能性が考えられる。

そこでレーザー加工機にてチタン材料に熱を与えた。厚さ0.1mm(SUS304)ステンレス材では直径0.1から0.2ミリ程度の穴をあけられるような加工条件の下レーザーを照射した。

加工条件は38頁付録参照

6.3.2 実験の結果

その結果、チタン材料は大きく溶解した。チタン材料は熱伝導率が極端に低いため照射時間、つまりパルス幅を長くするとチタン材料に熱が蓄積し、特に加工開始直後にこのような加工不安定状態となることが証明された。

したがって休止時間が短い場合、同様の現象が起き、結果として電極からの放電が少なくなり、それに伴い電極消耗比も減少することが証明された。



図6.4 溶解したチタン材料

表6.4 チタンと他金属との物理的性質の比較

	純チタン	アルミニウム	鉄	銅
比重	4.51	2.7	7.86	8.93
融点()	1668	660	1530	1083
ヤング率(MPa)	10.43	6.91	19.22	11.67
電気抵抗率(μ -cm \cdot 20)	47 ~ 55	2.7	9.7	1.7
電気伝導率(対Cu, %)	3.1	64	18	100
熱伝導率(cal/cm ² /sec/ /cm)	0.041	0.487	0.145	0.923

6.4 考察

6.2 に示した結果より、マイナス電極極性においてもパルス幅より休止時間を長めに設定した方が加工量は増加することがわかった。パルス幅 32 mSec では休止時間が短い条件の方が加工量が多くなる結果となったが、1 mm 掘り下げる加工をおこなった場合でも

加工面荒さがパルス幅 16 mSec では休止時間 32 mSec、パルス幅 32 mSec では休止時間 64 mSec で最も荒くなったという結果については、当初、加工不安定状態が起きていると考えたが、加工面を顕微鏡にて観察すると非常にきれいなクレーター状の放電痕のみで、安定した加工ができていることを証明している。

つまり、本来荒加工に向くとされる ST 回路およびマイナス電極極性の加工条件では安定した加工ができていることを示すものと判断できる。

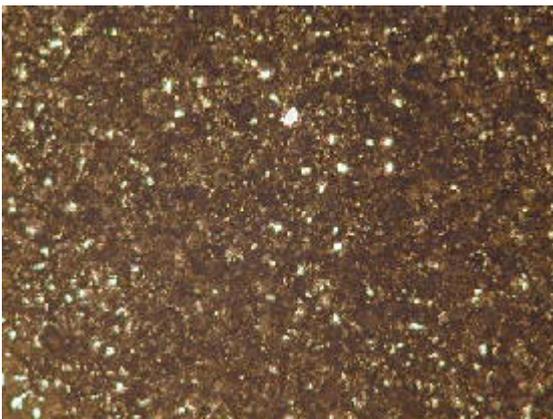
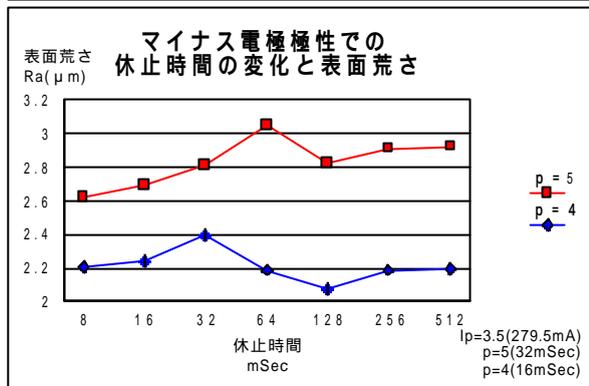
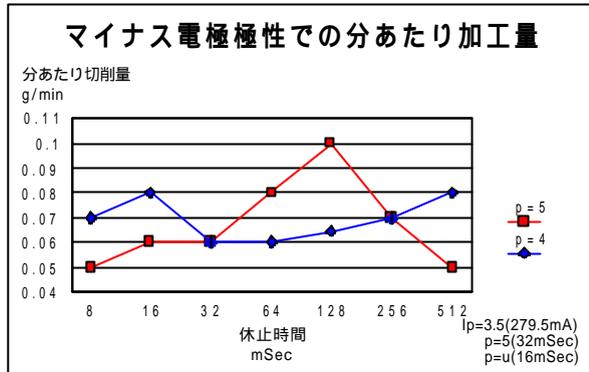


図 6.5 パルス幅 16、休止時間 32

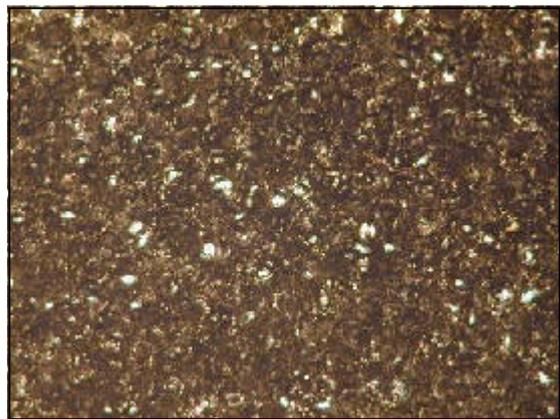


図 6.6 パルス幅 32 休止時間 64
(倍率 × 30 単位 mSec)

電極消耗比については安定した加工がおこなわれていることを前提とするならば、休止時間が増加すれば放電回数もそれに伴い減少するため消耗比も減少するものである。

しかし、今回、消耗比が徐々に増加する結果となったことに関しては、スラッジが堆積し加工不安定が起きている事も考え

られたが、4.3に示すようにチタン鋼の熱伝導率の低さが要因となり、放電で加えられたエネルギー以上に溶解が起こり、結果として放電回数も減り電極消耗比の減少していることがわかった。

また、第3章でプラス電極極性では深さ1mm以上の加工は不安定となり加工精度が著しく低下するが、同様の実験をマイナス電極極性にて行い、顕微鏡にて加工面を測定すると放電痕がはっきりと確認でき極めて安定した加工ができることが証明された。

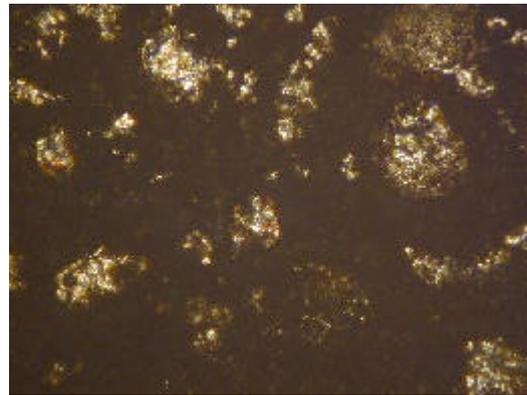
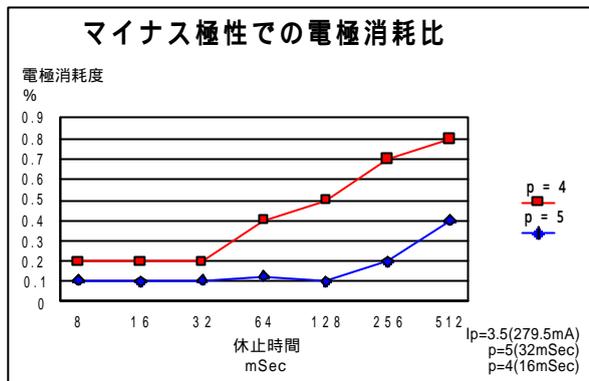


図6.7 マイナス電極極性で深さ1mmの加工を行ったもの(倍率×30)

第7章 全体の考察

7.1 加工特性調査実験のまとめ

以上のような実験をおこない、チタン材料の加工特性について、計測結果より以下のような結論を得た。

7.1.1 パルス幅と加工量の関係

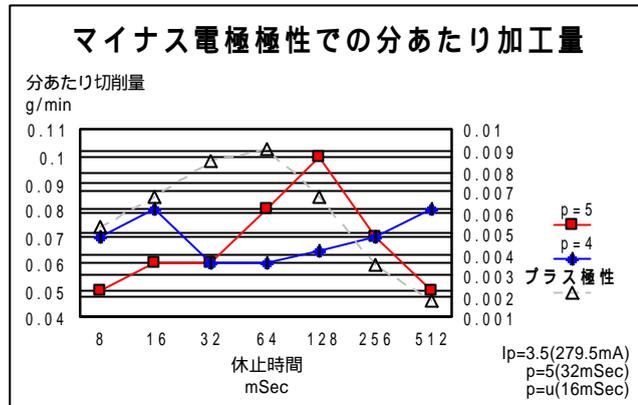
鉄系金属の場合パルス幅の増加に比例し加工量も増加するが、チタン材料の場合ではパルス幅とパルス幅16msecから32msecにかけてを頂点に再び加工量が減少する結果となり、パルス幅が長いと加工不安定になる傾向があることがわかった。

7.1.2 休止時間と加工量の関係

休止時間を多くとることでチタン材料に熱が蓄積されにくくなり、その結果加工が安定する事がわかった。

7.1.3 電極極性と加工量の関係

プラス電極極性の方がマイナス電極極性よりも加工量は多い結果となったが、加工が安定しにくく、特に1mm以上掘り下げる加工の場合は、加工量が多く、安定した状態で加工ができたパルス幅16m



Sec 休止時間32m Sec、パルス幅32m Sec、休止時間64m Secの2つの加工条件においても加工不安定となり、加工面に目視できるほどの凹凸ができてしまう結果となったのに対し、マイナス電極極性では安定した加工が可能であることが証明された。

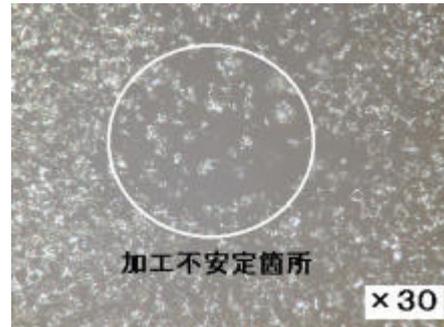
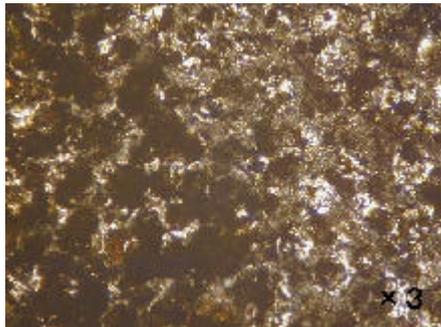
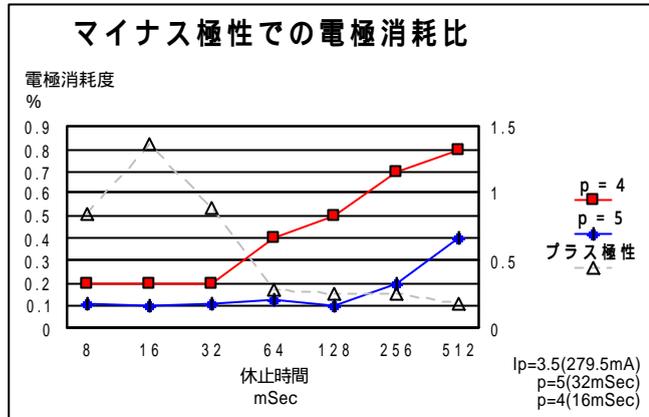


図7.2 マイナス電極極性での加工表面 図7.3 プラス電極極性での加工表面

7.1.4 電極消耗比と加工量の関係

電極消耗比はチタン鋼の場合においてもパルス幅、休止時間が増加するに従い、電極消耗比も減少することがわかった。

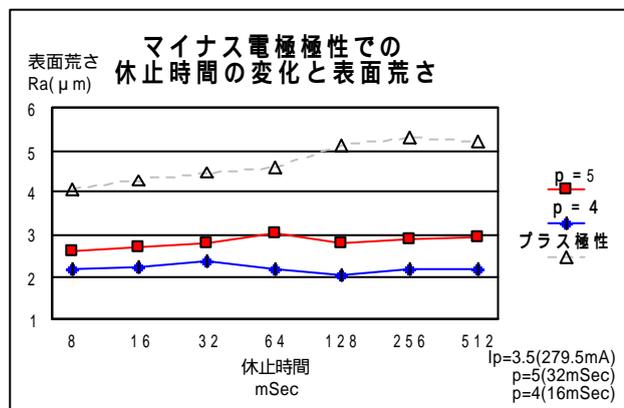
それにより、パルス幅、休止時間の変化に伴って減少するかどうか、加工が



安定しているかどうか 図7.4 極性の違いによる電極消耗比の変化の判断材料として扱えることが判明した。

7.1.5 休止時間と加工面荒さの関係

休止時間が増加すると加工表面荒さは、荒くなる傾向にある。チタン材料の場合は休止時間が短い場合、チタン材料に熱が蓄積し溶解が起こるため、加工不安定の場合はそれに当てはまらないものも発生するが、おおむね



休止時間の増加に伴い加工面荒さは荒くなる。特にマイナス電極極性の場合、荒加工に向くとされているが、上記グラフ上でプラス電極極性の方が表面荒さが荒くなっているのは加工不安定のためである。

7.1.6 電極消耗の形状

今回の実験ではチタン材料を加工した際、銅電極対鉄加工物と比較すると異形な消耗となることが判明した。

銅電極対鉄加工物の場合、通常端部から消耗が始まり、徐々に丸く消耗していくのに対し、銅電極対チタン材料の場合は中央部から消耗してゆく結果となった。(下記図7.6参照)

これについては、チタン材料は熱伝導率が低いため加工液の循環や噴出だけでは加工後に温度が上昇したチタン材料を十分に冷却できずに熱が留まりそれが銅電極にも伝わり融点の低い銅電極側で通常の消耗の他に溶解が起きていると考える。

加工液の流れ込みが端部と比較して悪い加工面中央部ではそれが顕著なものとなり今回のような消耗形状となったものとする。



図7.6 銅電極の消耗の形状

7.1.7 チタン材料での加工不安定状態

銅電極対鉄加工物の場合に起こりうる加工不安定状態の発生要因はおもにスラッジの堆積によるものが多いが(15頁第4章4.4.2参照のこと)、チタン材料では他の金属と比較して極端に熱伝導率が高い特性のため、放電エネルギーをチタン鋼に連続して与え続けることで溶解が起こる事が原因であることが分かった。

実験を開始する当初チタン材料においても加工不安定状態になるのはスラッジの除去不足が原因であると考え、スラッジを除去する事への対策のみを施していた。しかし、チタン材料の場合はパルス幅を短めとし休止時間を長めに設定することでチタン材料に熱が蓄積されないよう対策することが重要であることが判明した。

7.2 安定した加工ができる条件

以上の事象より安定した加工ができる条件について次のことが言える。

- パルス幅は短めに設定する。
パルス幅を長く設定すると放電エネルギーが熱としてチタン材料に蓄積され溶解し、加工不安定の原因となる。
- 休止時間はパルス幅よりも長く設定する。
休止時間を長く設定することで熱せられたチタン材料の加工液による冷却を十分に行うことで安定した加工の実現が可能となる。
- 電極極性はマイナスに設定。
マイナス電極極性はプラス電極極性と比較すると加工量は極めて少ないものの深く掘り下げる加工にも対応でき、逆にプラス電極極性では掘り下げる加工には向かない。
- 加工回路は超硬物加工用のTP回路を使用する。
SC回路は原則として銅電極対鉄加工物向けの加工回路であり、チタン材料の熱伝導率の低さには対応できず、加工不安定に陥りやすい。

7.3 結論

以上の条件より、パルス幅16mSecについては休止時間128mSec以上、パルス幅32mSecについては休止時間64、128mSecが有効と考えられるが電極消耗比を考慮すると電極交換回数は増え、段取り時間を加味すると結果的に加工時間は長くなることになる。従って今回の実験で効率の良い加工ができる加工条件は、

表7.1 安定した加工が可能な加工条件

	加工回路	電極極性	ピーク電流値(mA)	パルス幅(mSec)
1	TP	-	279.5	16
2	TP	-	279.5	32
	休止時間(mSec)	分あたり加工量(g)	面荒さ(Ra)	電極消耗比(%)
1	128	0.000065	2.17	0.0005
2	64	0.00008	3.05	0.00013

との結論を得た。

7.4 今後の展望

今回の実験ではチタンが銅、鉄に比較すると、熱伝導率が極端に低くまた、電気抵抗率、電気伝導率が極端に高いという特性が加工不安定状態を誘発させ、加工を難しいものになっている事がわかった。

今後、チタン含有率の異なるチタン合金での加工特性を調査することでチタン及びチタン合金の加工を容易なものとする事が期待できるものと思われ、今後の課題としたい。

第 8 章 結言

チタン材料は、本格的な実用段階に入ってからまだ50年ほどの新しい金属である。チタンの持つ銅の約半分の比重という軽量性、高い強度、耐食性、耐熱性によって航空宇宙産業での実用化が進み、化学工業、電力開発などで多用され、海洋開発においても様々な課題を解決する素材として成長、普及してきた金属チタンは医療分野でもその生体親和性の高さから人工骨の材料として注目されるようになった。

しかし、同時にチタンの持つ特性が加工を難しいものになっている事も事実であり、多くの製品が鋳造などで対応しているが、たとえば人工骨のような個人差のある骨格にあわせて高精度な加工を可能とする切削加工機は存在しない。

そこで卒業研究は、放電による熱的効果を利用して金属を加工する形彫り放電加工機に着目し、鋳造にて生産された既製品の人工骨を顧客一人一人の骨格にあわせて加工する人工骨生産支援システムの構築を前提としてチタン材料の放電加工特性を調査することとした。

放電加工においてもやはり、チタン材料の融点の高さ(鉄1530 に対し純チタン1668)や熱伝導率の低さ(鉄の3分の1以下)という特性によって銅電極対鉄加工物と比較し加工性が悪く遅くなる、加工不安定が起こり易いなど様々な障害が発生した。

特に加工不安定については当初スラッジの堆積による放電不均衡が原因と考えスラッジ除去への様々な対策を講じたが大きな成果を得ることはできず、加工したチタン材料の表面を顕微鏡で観察するとクレーター状の放電痕以外に溝ができていたのを発見した。

このような現象が起こる原因として溶解が考えられるが、融点の高いチタンにそのようなことが起こりうるのか、照射時間を調整することで自在にチタン材料に与える熱量を変化させることができるレーザー加工機にて加工を行った。

するとステンレス(SUS304)では0.2から0.3mmの穴が開く結果となったのに対しチタン材料では大きく溶解する結果となった。

このことからチタン材料は熱が溜まりやすく、それによって加工不安定になりやすいことがわかった。

したがって安定した加工を行うためには熱が蓄積されにくいようにパルス幅を短くし1回あたりの放電時間を減らし、冷却が十分行われるように休止時間を長く取る必要があるということがわかった。

このようにチタン材料を加工する場合、チタンの特性を考慮に入れ、他の金属とは異なる加工条件で加工する必要がある。

また、近年バナジウムやアルミニウムなどを添加したチタン合金の開発が盛んとなり、よりチタンの特性を生かすことのできるものが開発されている。これにより、チタン含有率の異なるチタン合金それぞれで加工特性が変化することが予想され、また、よりよい人工骨の材料の開発が期待される。今後の展望としてチタン合金の加工特性も調査しデータベース化することであらゆる製品の生産を行えることが期待できる。

謝 辞

本卒業研究及び研究論文は小林和彦教授のご指導の元に行われ、完成するに至りました。終始ご指導いただいた同教授に厚く御礼申し上げます。

また、橋本高志氏には本研究に使用されたチタン材料のワイヤーカット放電加工機での切り出しの際の加工条件に関して、松井浩氏にはレーザー加工機での実験の際、加工条件に関しての助言をいただき、深く感謝を申し上げます。

2001年2月28日

参考文献・資料

- 1) 三菱電機NC形彫り放電加工機VXシリーズ取扱説明書
第1章 システム 7.加工電源の説明
第3章 加工技術 1.放電加工の原理と機械の構成
- 2) 東邦チタニウム株式会社ホームページ
コンテンツ チタンについて
- 3) 社団法人日本チタン協会ホームページ
コンテンツ 6.チタン材料データベース
材料特性データベース

付録

1. レーザー加工機での加工条件

電流	36.0 A
パルス幅	5.0秒
ガス	酸素
材料 - レーザー発振装置間の高さ	3.5mm

2. チタン材料について

2.1 チタンの概要

チタンが元素として発見されたのは、およそ200年前のイングランドである。そして、本格的な実用化段階を迎えたのは、ルクセンブルクの冶金学者W. J. クロール博士が考案した「マグネシウム還元法（通称クロール法）」による米国での工業生産が始まった1948年のことであった。その後、50年の歴史の中で、チタンは、ジェットエンジンの材料など航空機産業を中心として、飛躍的な発展を遂げてきた。

金属としてのチタンは

- 比重が銅の約半分、鉄の約60%
- 比強度は鋼を上回る
- 耐食性はステンレスに勝る
- 耐熱性はアルミニウムをはるかに凌ぐ
- 生体親和性に優れている

などの特徴を持っている。

(次頁 表1 チタンの物理的特性の他金属との比較参照)

表 1 チタンの物理的特性の他金属との比較

	純チタン	アルミニウム	鉄	銅
比重	4.51	2.7	7.86	8.93
融点()	1668	660	1530	1083
ヤング率(MPa)	10.43	6.91	19.22	11.67
電気抵抗率(μ -cm \cdot 20)	47 ~ 55	2.7	9.7	1.7
電気伝導率(対Cu,%)	3.1	64	18	100
熱伝導率(cal/cm ² /sec/ /cm)	0.041	0.487	0.145	0.923

また、チタンは地殻に存在する元素として全元素の9番目であり、実用金属としては鉄、アルミニウム、マグネシウムに次いで多い元素である。資源（ルチルなどのチタン鉱石）としては、無尽蔵といわれている。

2.2 チタンの製法

金属チタンの製法（精錬）は、鉄鋼とはまったく異なり、化学精錬であり複数の工程を経てチタン材料となる。

以下に、一般的な製法であるクロール法を示す。

表 2 クロール法によるチタン精錬の過程

塩化	チタン鉱石 (主にルチル)の中の酸化チタンを塩素ガスと反応させることにより四塩化チタンを製造。
蒸留	上記四塩化チタンを蒸留により精製。
還元・分離	精製された四塩化チタンに熔融金属マグネシウムを反応させ、多孔質で塊状のスポンジチタンを製造。
破碎	塊状のスポンジチタンを切断機や解砕機で破碎し、顆粒状にする。
溶解	スポンジチタンを加圧成形したブリケットを溶解して円柱型のチタンインゴットを製造。