

# 修士論文

加工液を水もしくは油とした場合の  
Ni と Al の放電加工特性

指導教官 中西 栄徳 准教授

令和元年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

北川 雄大

## 目次

1	緒言 .....	1
2	放電加工現象 .....	2
2.1	放電加工の原理 .....	2
2.2	加工極性 .....	4
2.3	加工屑の排出機構について .....	6
2.3.1	加工屑の排出方法 .....	6
2.3.2	超音波振動による方法 .....	7
3	実験方法 .....	8
3.1	試験材料 .....	8
3.2	実験装置 .....	9
3.3	実験条件 .....	12
4	Ni に対する放電加工実験 .....	13
4.1	加工液に油を用いた加工 .....	13
4.1.1	極性を正極性とした場合 .....	13
4.1.2	極性を逆極性とした場合 .....	21
4.2	加工液に水を用いた加工 .....	25
4.2.1	極性を正極性とした場合 .....	25
4.2.2	極性を逆極性とした場合 .....	32
4.3	考察 .....	38
5	Al に対する放電加工実験 .....	41
5.1	加工液に油を用いた加工 .....	41
5.1.1	極性を正極性とした場合 .....	41
5.1.2	極性を逆極性とした場合 .....	46
5.2	加工液に水を用いた加工 .....	50
5.2.1	極性を正極性とした場合 .....	50
5.2.2	極性を逆極性とした場合 .....	54
5.3	考察 .....	58
6	結言 .....	59
文 献	.....	60
謝 辞	.....	61

## 1 緒言

放電加工とは絶縁性の加工液中で加工電極と被加工物との間に短い周期で繰り返されるアーク放電により火花を発生させ、被加工物表面の一部を除去する加工方法である。加工液には主に水や油を用いるが、使用する加工液により加工特性は異なる<sup>1)2)</sup>。また、加工電極と被加工物のどちらを正、負とするかによって決まる極性の違いによっても加工特性は異なる。さらに、放電加工では「加工電極に銅タングステン、被加工物に超硬合金を用いる場合、正極性が適する」、など使用する加工電極と被加工物の組み合わせにより、極性、加工液などの適正条件も異なる。

放電加工は、従来の機械加工技術では加工できなかった固い金属への適用が可能なため、金型の製作や、微細な穴加工など広く用いられている。しかし、放電痕形成メカニズムに関しては明らかになっておらず、オシロスコープによる放電波形の計測<sup>3)</sup>やハイスピードカメラ、透明体電極を用いた極間現象の観察<sup>4)</sup>などの研究が進められている。これらの先行研究により少しずつ解明されつつあるが、未だ不明な点が多く残っているのが現状である。

そこで本研究では、放電痕、加工電極の表面層成分に着目し、加工液、加工物、加工極性による特性を比較することで放電痕形成メカニズムを明らかにすることを目的とした。

一般的に放電加工では 60 V 以上の電源が用いられているが、30 V 以下の電源を用いた加工は電極形状の転写精度が高上する<sup>5)</sup>。この性質により加工特性の比較も容易になるのではないかと考え本研究では低電圧電源下での放電加工を行った。

## 2 放電加工現象

### 2.1 放電加工の原理

図 2.1 に放電加工の概念図を示した。水や油などの絶縁体の加工液中で数 10  $\mu\text{m}$  程度の極間距離を隔てて工具電極と被加工物の間にパルス状にアーク放電を生じさせる。毎秒数千回～数万回の放電が生じるので、加工面全体で同時に放電しているように見えるが、実は 1 つのパルスで絶縁破壊が生じる場所はただ 1 か所であり、そこに放電電流が集中してアーク柱を形成する。アーク柱近傍の極間の模式図を図 2.2 に示す。アーク中心部で 6000～7000 K に達する高温下<sup>6)</sup>において被加工物は短時間で熔融・蒸発し微小な放電痕が形成される。そして、加工層は加工液に接して再凝固し、微小な球となって加工液とともに極間から排出される。

次のパルスは前のパルスの放電点の温度が十分低下し、絶縁が回復した後に印加される。前の放電点では放電痕の深さの分だけ極間距離が広がっている。また、放電発生を引き金の役割を持っていると考えられる加工層も放電点からは飛散してしまっている。従って、次のパルスで再び同じ位置に放電が生じる確率は小さく、他の極間距離が狭いか、あるいは加工層濃度が高いところに放電点は移動する。こうしてパルス放電の繰り返しにより放電点が電極面上に一様に分散し、工具電極形状が被加工物に転写される。

放電をパルス化し放電点を分散させることは加工の安定性にとって本質的に重要なことである。仮にパルス化せず連続的に電流を流した場合、最初に放電が生じた点での温度がいつまでも下がらないため絶縁が回復せず、放電点が他の箇所に移動できない。従って、工具電極形状が転写できないばかりか、1 か所に集中して大きな熱的ダメージを残すだけの結果となる<sup>7)</sup>。

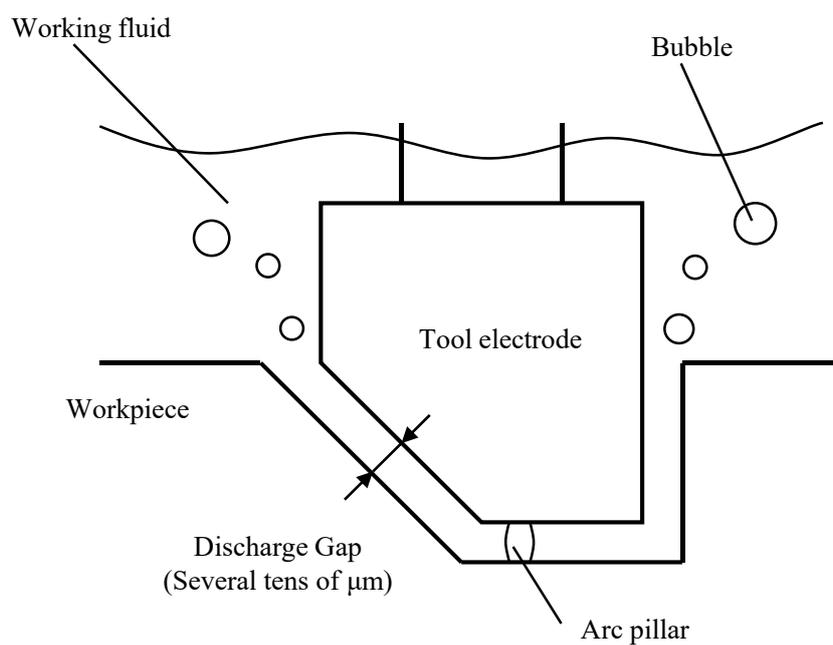


Fig. 2.1 Processing principle

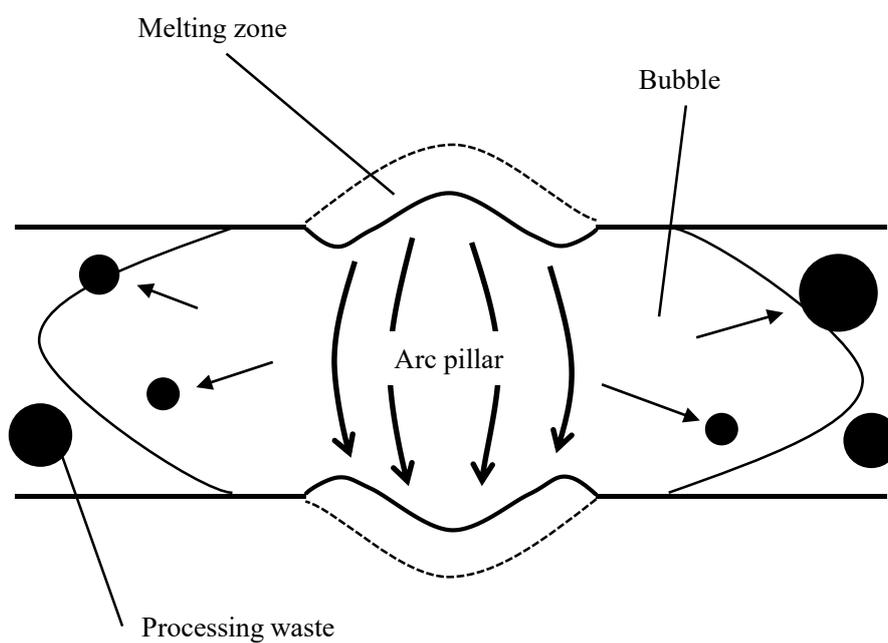


Fig. 2.2 Inter-electrode phenomenon

## 2.2 加工極性

放電加工には極性というものが存在する。これは加工電極，被加工物のどちらを正，負とするかによって定まる。加工電極を負，被加工物を正とした場合を「正極性」，加工電極を正，被加工物を負とした場合を「逆極性」と呼ぶ。使用する極性により加工特性は異なる<sup>8)</sup>。

極性による材料除去メカニズムの違いを図 2.3 に示す。正極性において最初の熔融材料の飛散は，入熱密度が非常に高く，最表面は瞬時に蒸発状態となり，これによって熔融材料の盛り上がりあるいは飛散が生じる。その後，アーク柱は膨張によって入熱密度は低下するが，表面への加熱は継続され，伝導熱により内部に熔融域ができる。表面の蒸気圧がある限界を超えると，表面蒸発による反跳力<sup>9)</sup>が生じ，熔融した内部の材料が吹き飛ばされる。反跳力によって熔融材料が飛散する時に，熱も一緒に持っていかれる。そのため，熔融材料が飛散した後，新しく出現した面が再び加熱されることになる。なお，表面加熱によって沸点に達する時間は，放電点の電流密度（加熱流密度）と沸騰潜熱および沸点と加熱開始時点での温度差などが効いてくる。このようなプロセスが放電中に繰り返し発生し，一発の放電中に複数回の材料の除去が行われる。

逆極性については，電流密度の高い放電点が表面を不規則に移動する。正極性における 1 回目の除去プロセスが放電中に繰り返し生じる。このように，陰極側における除去プロセスは蒸発が主体であるが，陽極側では蒸発に加え熔融材料を加工層として排出している。

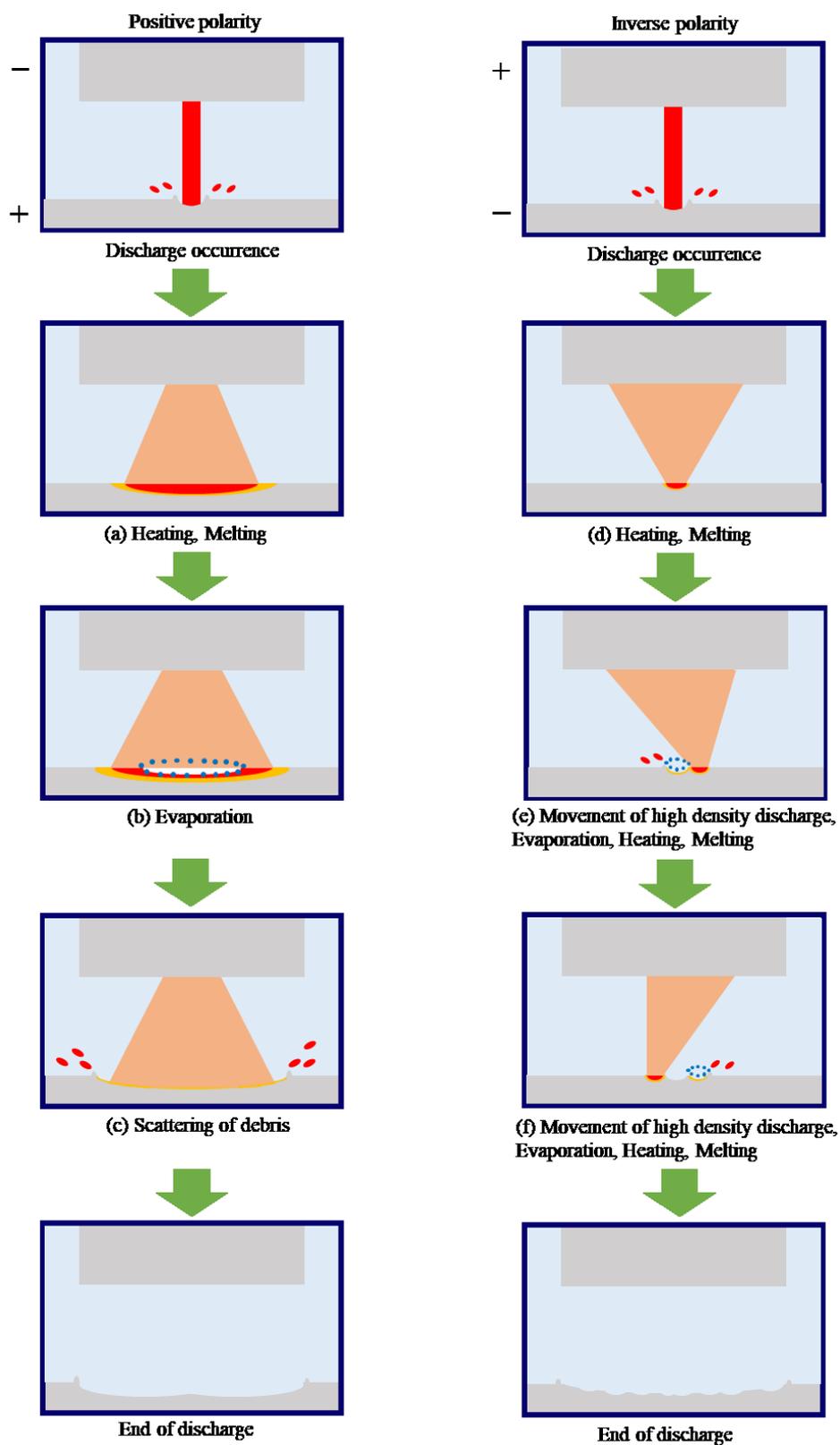


Fig.2.3 Model of the material removal mechanism

## 2.3 加工屑の排出機構について

### 2.3.1 加工屑の排出方法

極間隙に生成される加工屑の排出は放電加工を行う上で問題となる。特に加工穴が深くなるのに伴い加工屑の排出性は低下し、加工穴底面に滞留した加工屑により短絡や異常放電を繰り返し、加工速度が低下するとともに工具電極消耗が激しくなることがわかっている。

加工屑の排出を促す作用として、加工液が挙げられる。放電加工において、加工液は、極間の絶縁、極間の冷却、溶融部の除去、加工屑の排出、絶縁の回復等多くの役割を担っているとされている<sup>10)</sup>。一般的には、形彫り放電加工では油、ワイヤーカット放電加工では純水または油を使用し、水を用いることで加工時間によっては被加工物が腐食することがあるため加工要件に合わせて加工液を選択する必要がある。

他に加工屑を排出する方法として、図 2.4 に示すようなジャンプ運動が挙げられる。ジャンプ運動とは、工具電極を急速に往復運動させて汚れた加工液を極間から追い出す周期的な動作の事である。工具電極の往復距離が大きければより多くの清浄な加工液がギャップに流れ込み、より多くの汚れた液が極間から排出される。ジャンプ中は被加工物の除去が行われなため過度に頻繁なジャンプは加工速度を低下させる原因となる。

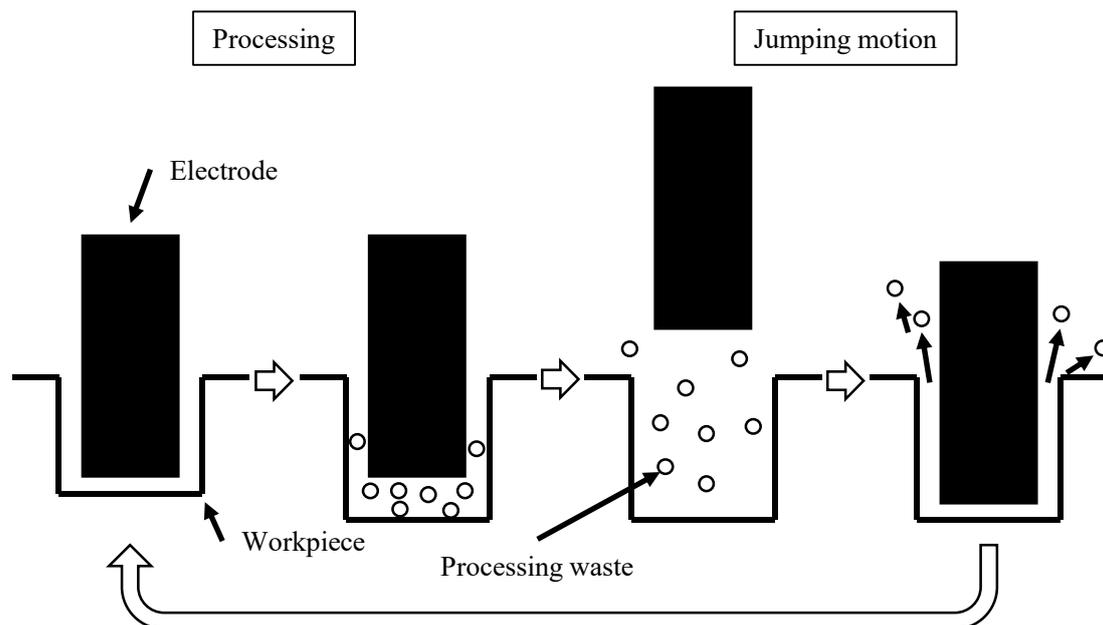


Fig. 2.4 Jumping motion in discharge of electric discharge machining waste

### 2.3.2 超音波振動による方法

本研究では加工屑の排出方法として超音波振動を採用した。超音波振動は発振周波数において収縮，拡大を繰り返す。結果として生じる振動は縦波であり，ピーク位置からゼロ位置までの変動距離は片振幅と呼ばれ，超音波振動における片振幅は  $5\sim 50\ \mu\text{m}$  である。この振動による往復運動を，2.3.1 で述べたジャンプ運動の代わりとして用いた。

また，加工液中には無数の気体分子が溶解込み分散しており，超音波振動を印加させ，音圧をあるレベル以上にするとキャビテーションが発生する<sup>14)</sup>。キャビテーションは液体の流れの中で圧力差により短時間に泡の発生と消滅が起きる物理現象であり，超音波洗浄機などで活用されている。図 2.5 に示すように，このキャビテーション作用により，放電加工において極間で増加する気泡を崩壊し，加工屑の排出を促すことが出来ると考えられる。

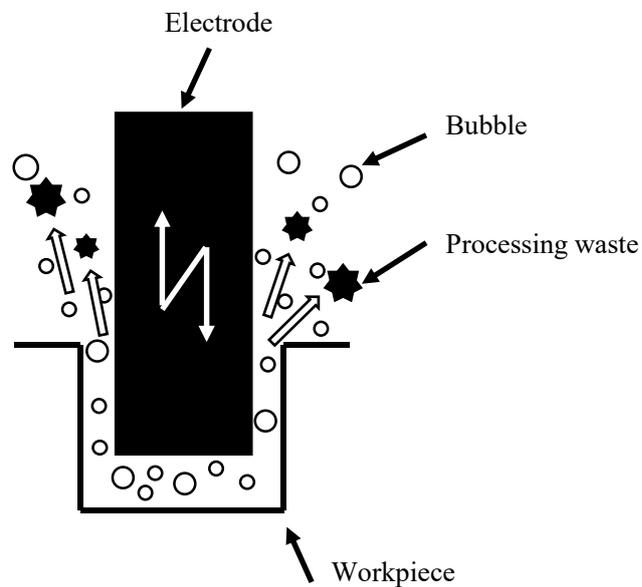


Fig. 2.5 Influence of cavitation in discharge of electric discharge waste

### 3 実験方法

#### 3.1 試験材料

被加工物は多形を持たない純金属のニッケルとアルミニウムを採用し、純度 99% 以上のニッケル板( 株式会社ニラコ NI-313511 ) , 純度 99.5% のアルミニウム板( 株式会社エスコ EA441WA-13 ) を使用した。寸法はすべての材料において 10 mm 角, 厚さ 1 mm として, 使用寸法に切断後にバリを除去するために面取り加工を施したものを使用した。

加工電極として, 純度 99.95% のタングステン線( 株式会社ニラコ W-462484 ) を使用した。寸法は直径 1 mm, 長さ 10 mm に切断して使用した。タングステン線の固定方法については 3.2 で記述する。

加工液には精製水, 純度 99% 以上の n - テトラデカン( 関東化学株式会社 40824-00 ) を使用した。テトラデカンは, 炭化水素の一種で炭素が 14 個連なった直鎖のアルカンであり, 石油中に含まれる極性を持たない無色の液体である。物性のわかっている油を用いることで分析の際に結果が明瞭になり, 実験時の危険度も考慮したうえでテトラデカンを採用した。テトラデカンの物性については表 3.1 に記載した。以降, 精製水を水, テトラデカンを油と記述する。

Table 3.1 Chemical composition of n-Tetradecane

<b>Molecular formula</b>	<b>CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>12</sub>CH<sub>3</sub></b>
<b>Molecular weight</b>	<b>198.39</b>
<b>Melting point</b>	<b>5.5[°C]</b>
<b>Boiling point</b>	<b>253.5[°C]</b>
<b>Specific gravity</b>	<b>0.767[-]</b>
<b>Vapor density</b>	<b>6.83[kg/m<sup>3</sup>](vs air)</b>
<b>Vapor pressure</b>	<b>1[mmHg](76.4°C)</b>
<b>Kinematic viscosity</b>	<b>9.25[mm<sup>2</sup>/s](37.8°C)</b>

### 3.2 実験装置

本実験に使用した放電加工装置の概略図を図 3.1 に示す。超音波振動により極間距離の調整なしで放電が行える装置を使用した。マイクロ放電加工において、放電が生じる極間距離の調整は困難であるため超音波振動により解決した。第 2 章の 2.3.2 で述べたように一般的な超音波振動の片振幅は 5~50  $\mu\text{m}$  であり、対してアーク放電が発生する極間距離は 5~100  $\mu\text{m}$  である。図 3.2 に示すように超音波の振幅の範囲内に放電ギャップが存在するため加工に用いることができた。また本実験で使用する超音波振動装置の振幅は 30  $\mu\text{m}$  のものを使用した。放電を発生させるため一般的には第 2 章の 2.1 で述べたように、パルス状に電気を発生させる機構が必要となる。そこで本研究では電氣的な極間距離の制御は低電圧条件において放電ギャップが微小になり困難なため、超音波振動による機械的な作用で加工を行う簡易的な方法を採用した。電源には直流電源を使用し、電源電圧は 11.6 V で一定とした。

工具電極側には発振方式が自励発振で定格出力 150 W、公称発振周波数 28 kHz の超音波振動装置(本多電子株式会社 SONAC-150)を使用した。図 3.3 に示すように、超音波振動装置に取り付けられたホーン先端に工具電極を取り付けた。工具電極は黄銅の全ねじ中心に直径 1 mm、深さ 7 mm の穴を開け、すり割りを入れたところに直径 1 mm のタングステン線を圧入し、途中までねじ切りをした治具を先端に取り付けることによりタングステン線を固定した。それをホーン先端に加工したねじ穴にナットを使用して固定した。超音波振動子は固定されておらず、ばね定数 47.56 N/mm のばねで吊っている。

被加工物側は図 3.4 に示す加工液を溜める加工槽を使用した。加工槽の深さは、加工中の安全や加工部に空気が混入することを防ぐため 30 mm とした。被加工物は加工槽中心に置き、上から黄銅の固定板で挟み込んで固定した。また、加工中は非常に高温になるため加工槽下部に穴を開け水冷できるようにした。加工槽に取り付けた Z ステージ(中央精機株式会社 LV-937-1)をステップモーター(オリエンタルモーター株式会社 PKP568N28A2-R2GL)により上下方向に制御している。Z ステージの作動距離は 10 mm、感度は 0.003 mm のものを採用した。位置制御にはレーザ距離計(パナソニック株式会社 HG-C1030(-P))を使用した。測定範囲は  $\pm 5$  mm、繰り返し精度 10  $\mu\text{m}$  のものを採用した。制御に必要なシステムとしてマイコンボード(Arduino Uno R3)を使用した。Arduino とは、AVR マイコン、入出力ポートを備えた基盤、C 言語に似た Arduino 言語とそれの総合開発環境から構成されるシステムである。

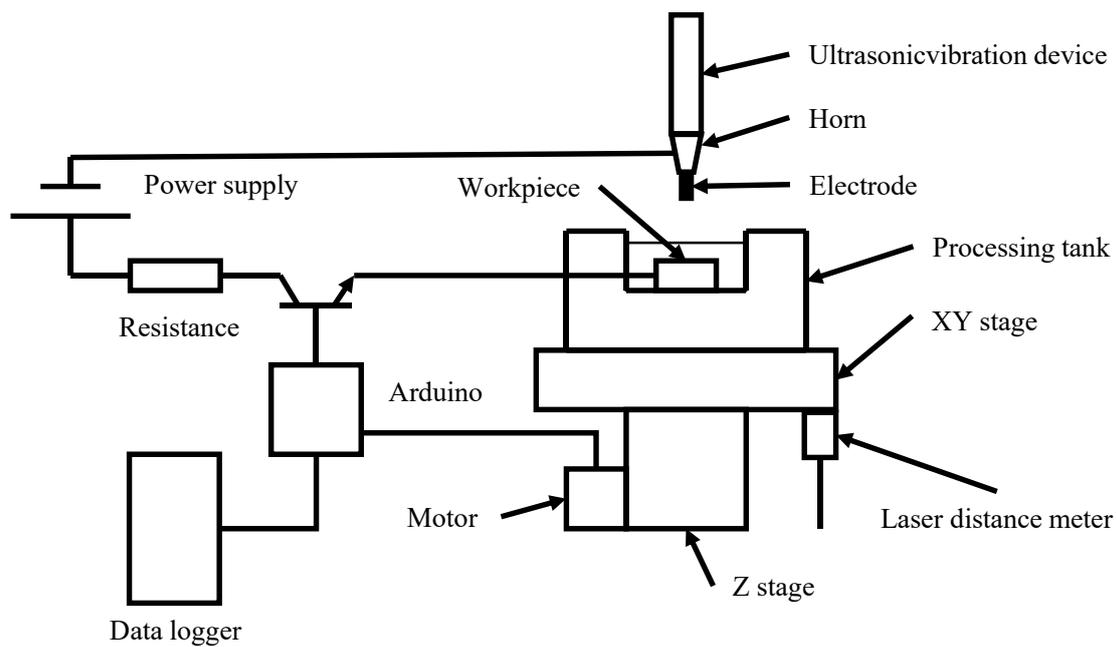


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus

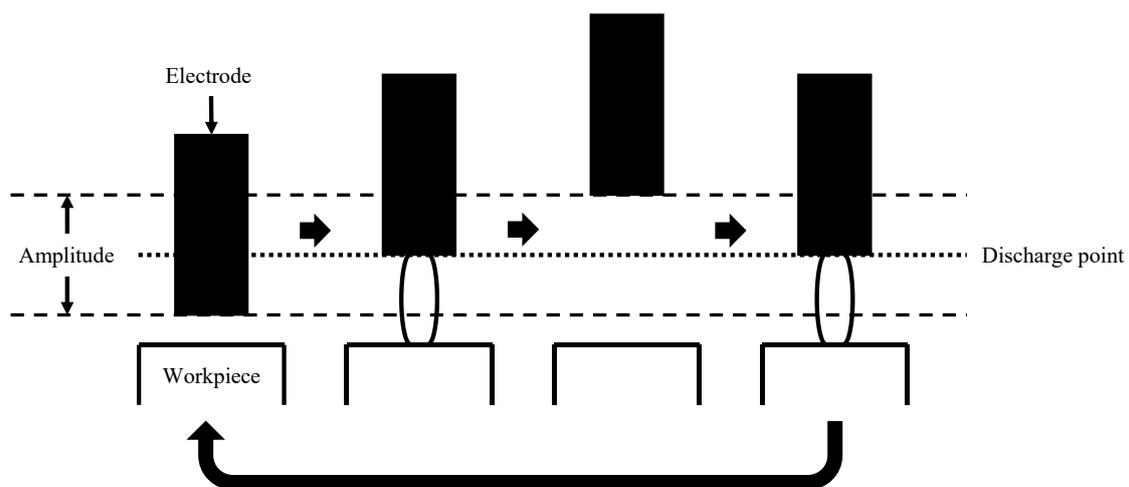


Fig. 3.2 Relationship between discharge gap and amplitude of ultrasonic wave

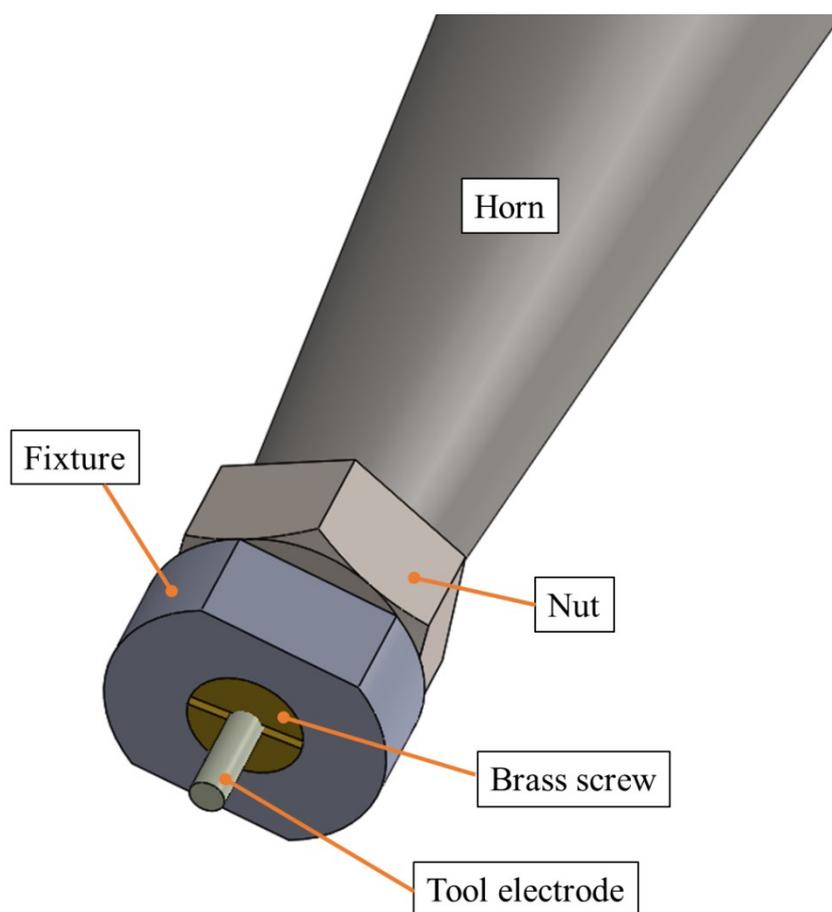


Fig. 3.3 Schematic diagram of the tool electrode attached to the tip of the horn

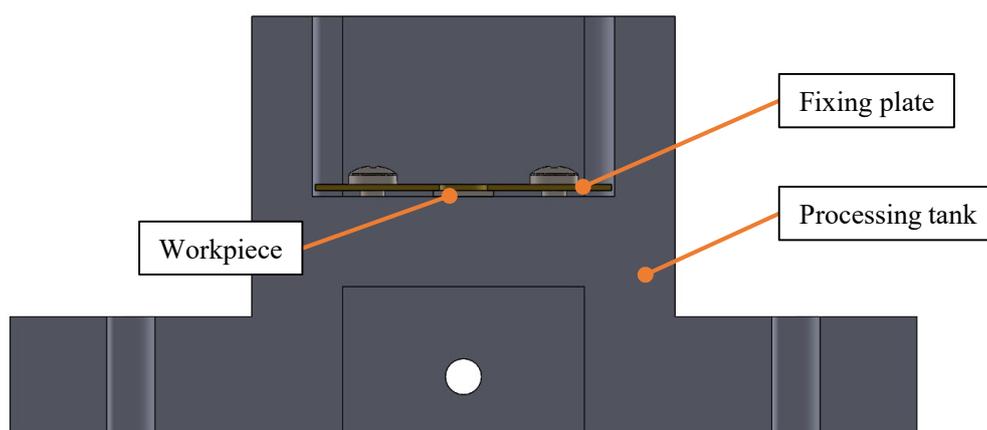


Fig. 3.4 Schematic diagram of machining tank

### 3.3 実験条件

Ni, Al それぞれを油, 水, さらに正極性, 逆極性の4通りで加工をする.

実験の手順として, 放電を発生させる前に Arduino により Z ステージを最下点まで移動させた. 工具電極と被加工物を十分に離れた状態からステッピングモーターに 1 パルスずつ出力することによる微小送りで被加工物を工具電極に近づけ, 端面検知用回路により, 被加工物と工具電極との接触を極間の電圧をモニタリングし電氣的に検知した. この位置を加工開始位置とした. ここで自作の電源装置と超音波振動装置の電源を入れ, ステッピングモーターの粗動で被加工物を工具電極に徐々に近づけていった. 加工時間は 250 s とした. 加工屑実験では観察に必要な量が取れるまで行った. ステージの送り速度は 0.003 mm/s とする. よって電極の押し付け荷重は 0~35.67 N である.

以上の条件により加工を行った試験片, 加工電極に対して元素分析仕様 走査型電子顕微鏡(日本電子株式会社 JSM-5600LV)を使用し, SEM 画像による観察, 電子線マイクロアナライザー(EPMA)によるスペクトル分析, 元素マッピングも行った.

また, SEM 画像の撮影にはより高倍率での観察が可能な電解放出系走査型顕微鏡(株式会社日立ハイテクノロジーズ S4300)も併用し, 観察を行った.

顕微鏡観察の前準備として, 放電痕形状の観察については加工後の試験片に超音波洗浄を行い, 観察ができる状態にして試料台に炭素テープを使用して固定した. 放電痕の断面観察については, 次の2つの方法で試験片を作成した. 1つ目は, 試験片切断用のダミー板に加工後の試験片を固定する. それを厚さ 1 mm程度にダイヤモンドカッターで切断し, 平面研削台に固定する. 偏光顕微鏡試料作製機(株式会社マルトー MG-300)で放電痕部分の平面を出した後, 卓上半自動研磨機(株式会社マルトー ML-150P)により鏡面仕上げを行った. 2つ目は, 試験片の加工部をなるべく小さくトリミングする. それを同様に平面研削台に固定し, 上面から研削, 研磨を行った. 加工屑の観察については, 実験により採取した加工液にアセトン(関東化学株式会社 01026-70)を使用してろ過した. ろ紙に付着した加工屑をインジウム箔(株式会社ニラコ IN-203381)に振りかけ, 測定試料とした. 加工屑については, 炭素テープを使用すると分析の際に支障が出るためこの方法を採用した.

## 4 Ni に対する放電加工実験

### 4.1 加工液に油を用いた加工

#### 4.1.1 極性を正極性とした場合

加工液に油を用いて Ni に正極性という加工条件での観察を行った。

放電痕の SEM 画像を図 4.1 に示す。放電痕の形状は加工電極と同様に円形である。(b)からわかるように表面状態は一様ではない。さら写真左下を見ると面の上に面が覆いかぶさっている。さらに高倍率で観察した(c), (d)より, (c)のような滑らかな面と(d)の小さな粒が密集しているような粗い面が存在していることが確認できた。

放電痕をスペクトル分析した結果を図 4.2 に示す。SEM 画像中の赤い点で示した箇所に対して点分析を行った。図 4.1(c)のような滑らかな面が(a)に当たる。これを見ると母材である Ni によって形成された面であることがわかる。その他には加工液に含まれる C, 加工電極に使用した W が少量存在している。一方, 図 4.1(d)のような粗い面が(b)に当たるが, こちらは(a)とは対照的に炭素のピークが最も大きく, 次いで(a)で大部分を占めた Ni が見られた。

放電痕断面の SEM 画像を図 4.3 に示す。放電痕全体, 底部の各 2 枚観察した。(a)からわかるように放電痕断面の形状としては半円形に近い形状をしている。(b)からわかるように, 20~30  $\mu\text{m}$  程度の層状のものが確認できた。この層は, 気孔のようなものがいくつか存在し, 明らかに純ニッケル面とは違う形状のものが生成され, 何層にも重なっていることが確認できた。

放電痕断面のスペクトル分析結果を図 4.4 に示す。スペクトル分析は SEM 画像中の赤い枠で示した箇所において面分析を行った。この層は主にニッケルであり炭素も含むことがわかった。

タングステン加工電極の SEM 画像を図 4.5 に示す。(b), (C)からわかるように 20  $\mu\text{m}$  前後の大きな塊が点々と存在し, その周りを囲うように放電痕表面と同様の小さな粒のようなものが存在する面が確認できた。(d)より塊の表面には径 1~2  $\mu\text{m}$  程度の非常に小さな放電痕のようなものが多く確認できた。

加工電極の元素マッピング, スペクトル分析結果を図 4.6, 図 4.7 に示す。これらより図 4.8(a)の点をはじめとする塊は加工電極の母材である W であることがわかる。このタングステンを囲う粗い面は C のピークが大きく出ている。

今回に限らず元素マッピングにおいて, 図の上部や右側のように黒くどの元素も反応していない箇所が存在するが, 実際はいずれかの元素が存在しており, 加工対象の幾何学的形状によるものなので, 無視して考える。

ニッケルに対する加工層の SEM 画像を図 4.8 に示す。5  $\mu\text{m}$  以下の球状の加工層が多く観察された。5  $\mu\text{m}$  以上の塊となっている加工層もいくつか確認されたが, 塊となっている加工層は球状の層がいくつか集まってできているものが多かった。

加工層のスペクトル分析結果を図 4.9 に示す。被加工物である Ni が一番多く、次いで油に含まれる C という結果となった。

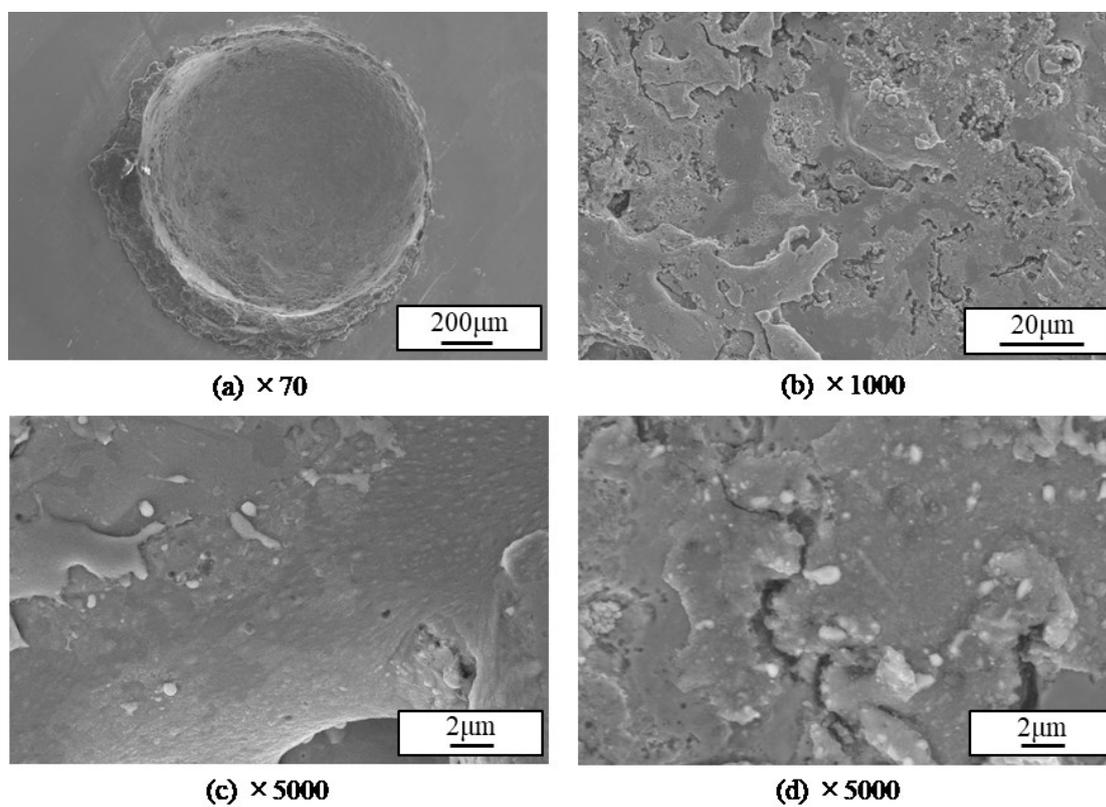
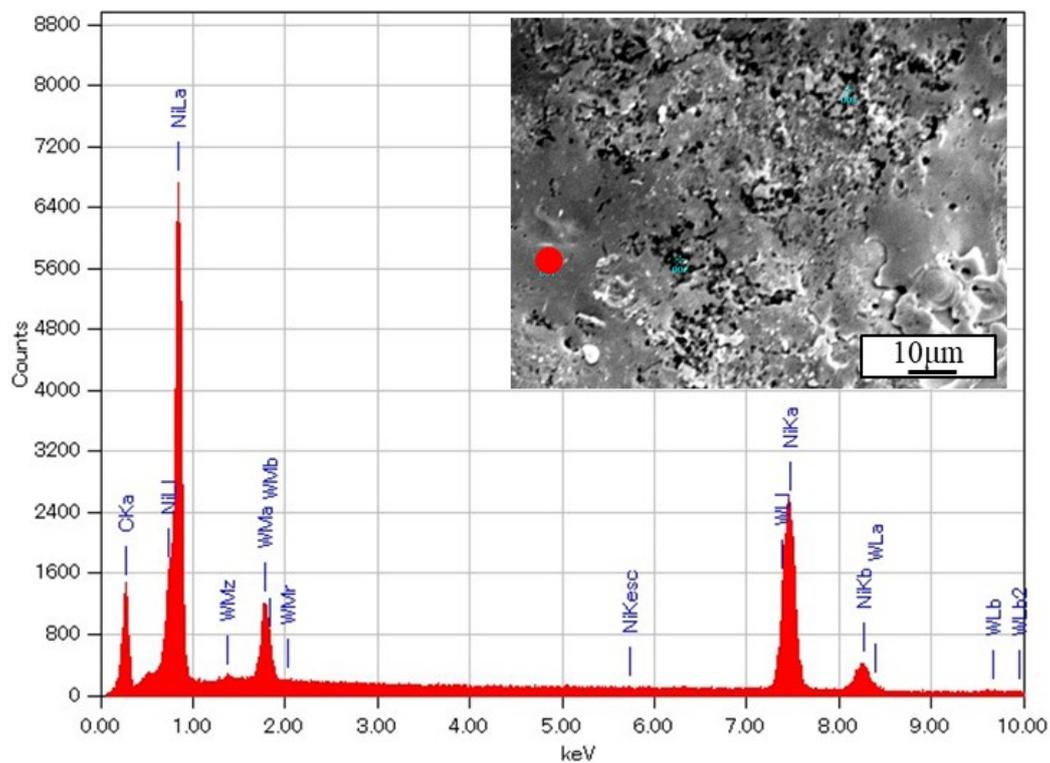
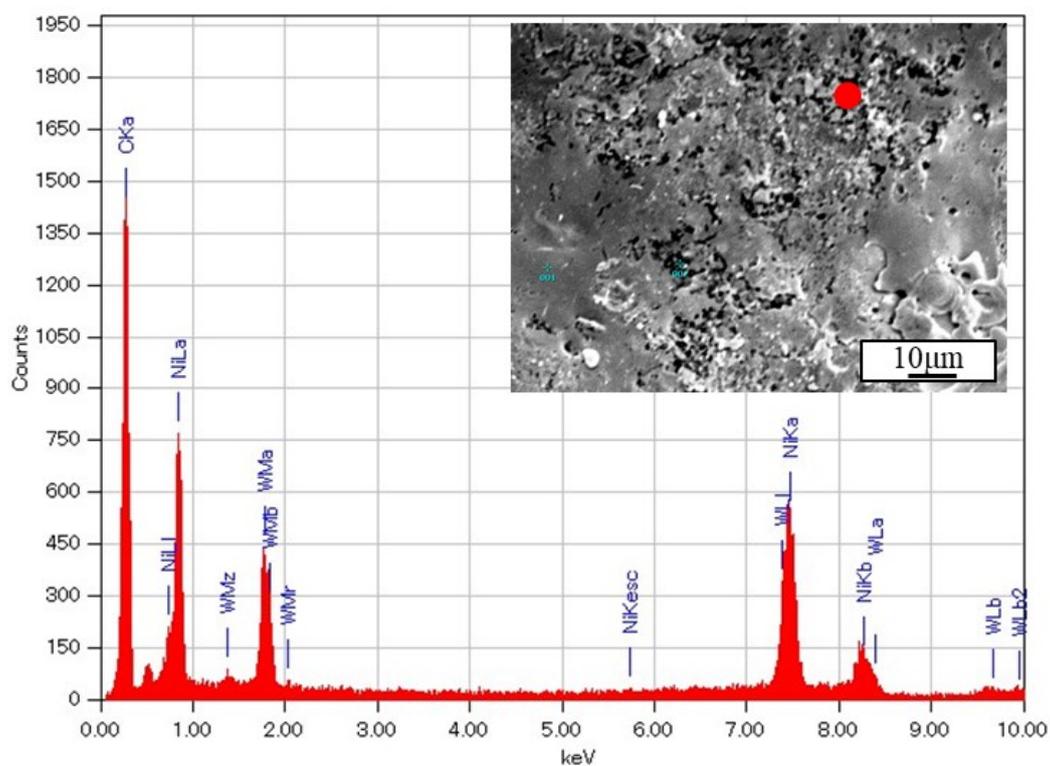


Fig.4.1 SEM image of the discharge crater surface at each magnification



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.4.2 Spectrum analysis results of the discharge crater surface

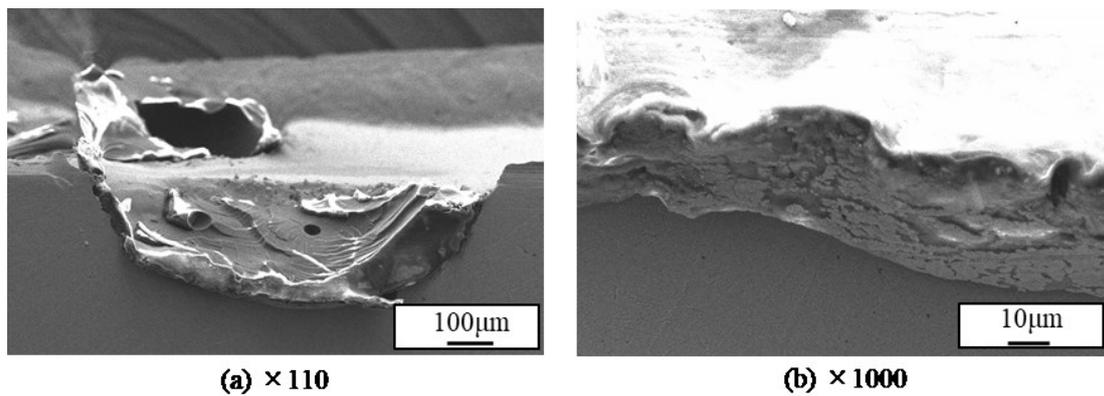


Fig.4.3 SEM image of the discharge crater cross section at each magnification

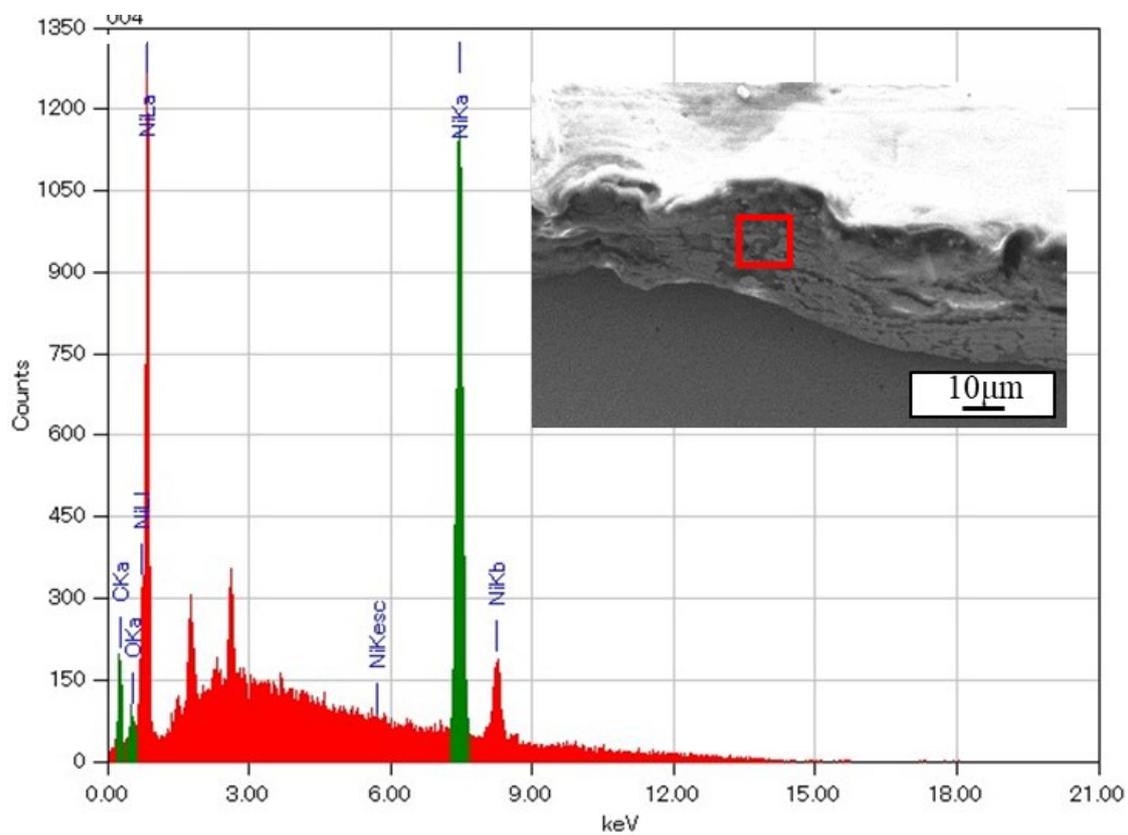


Fig.4.4 Spectrum analysis results of the discharge crater cross section

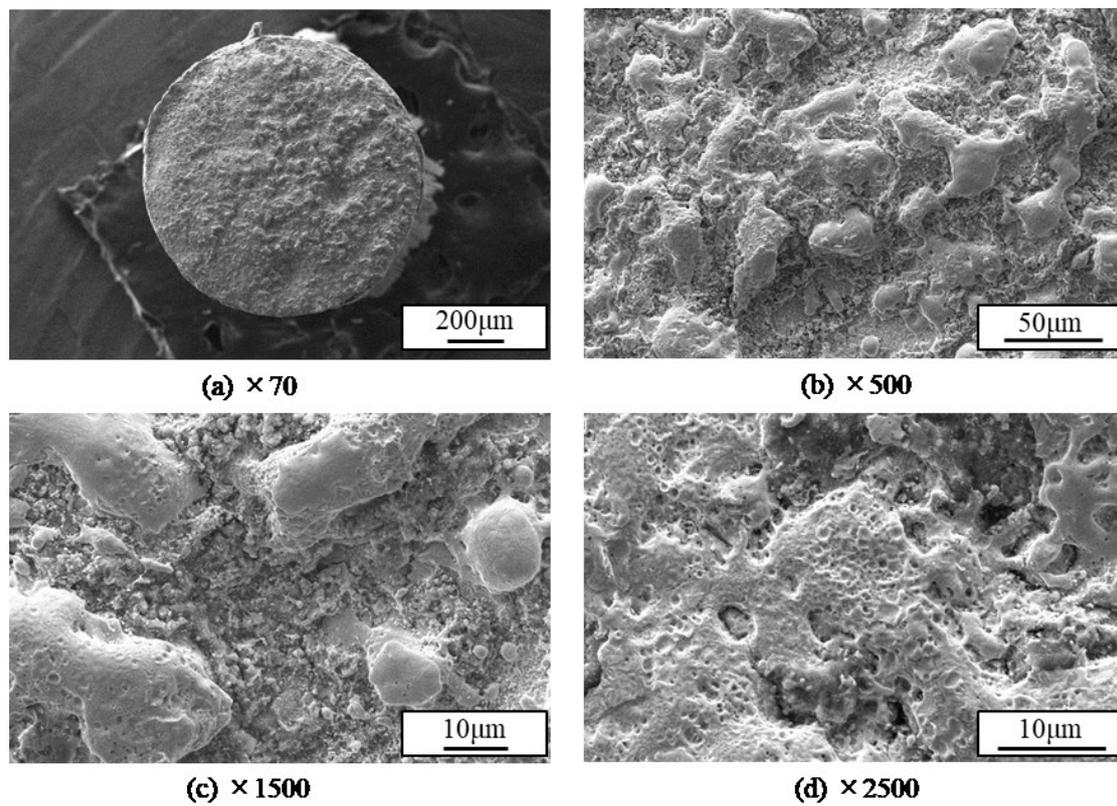


Fig.4.5 SEM images of the machining electrode surface at each magnification

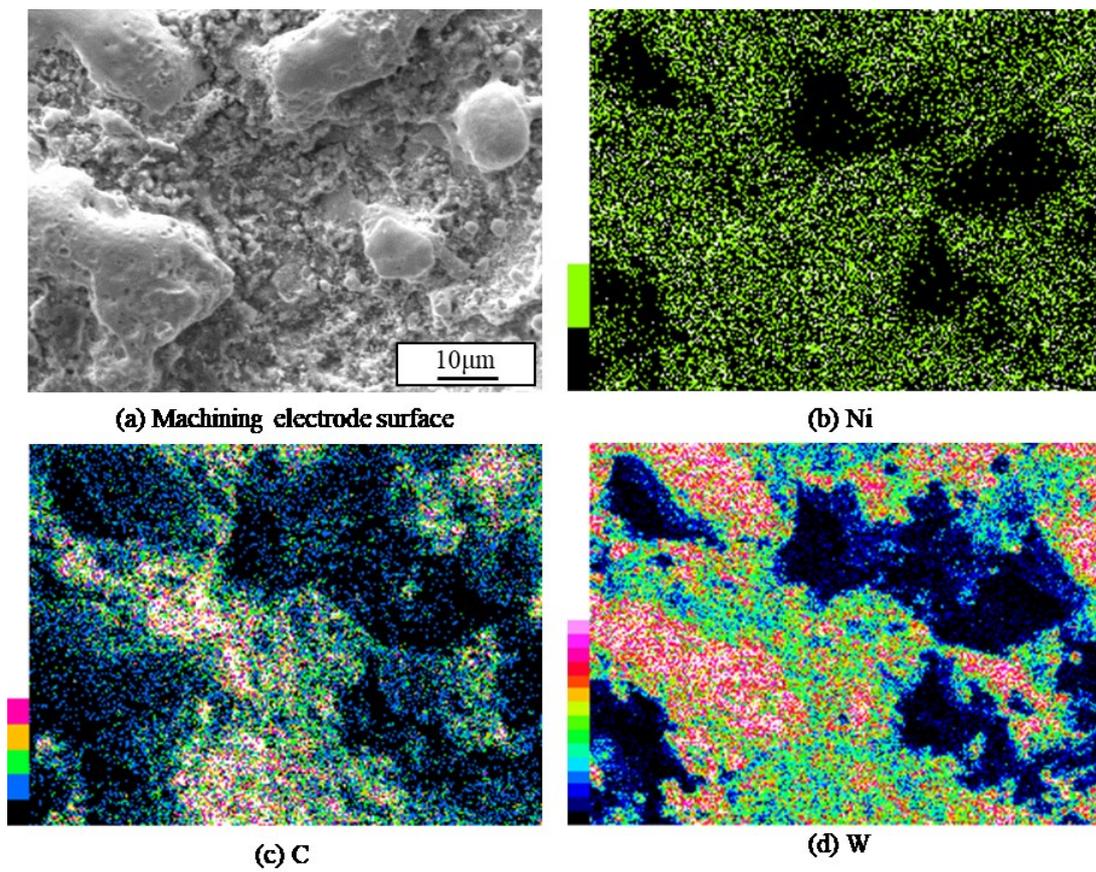
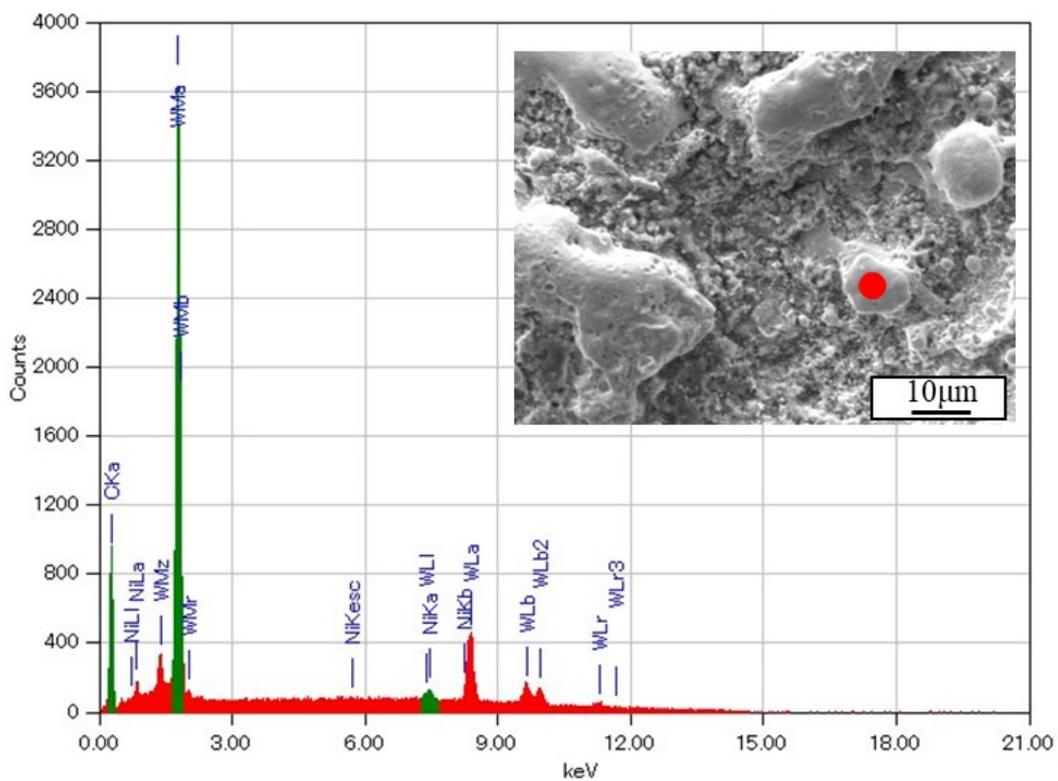
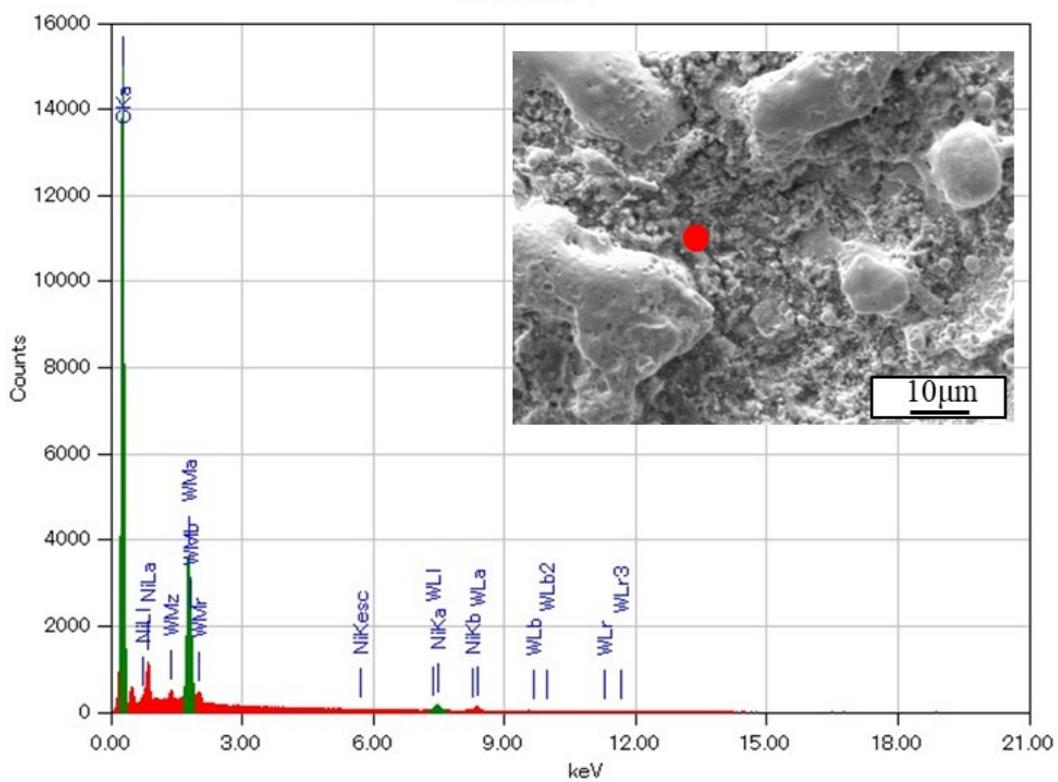


Fig.4.6 Element mapping of the machining electrode surface



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.4.7 Spectrum analysis results of the machining electrode surface

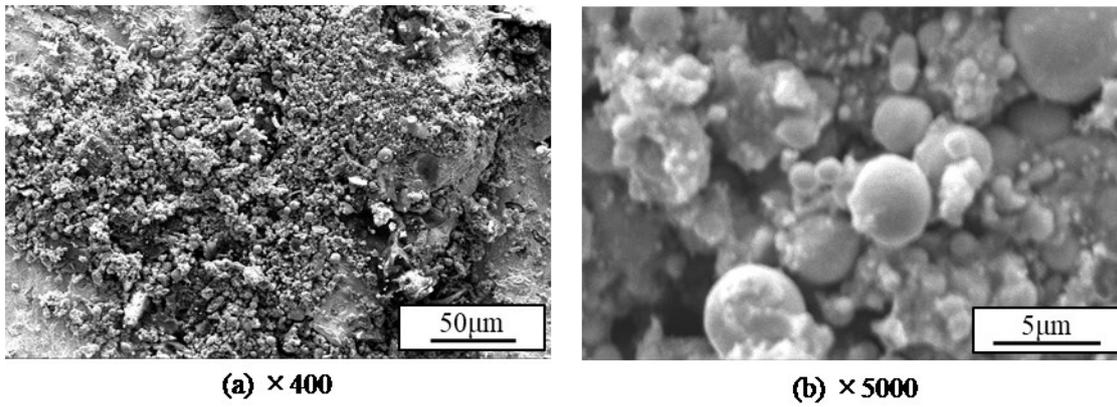


Fig.4.8 SEM images of electric discharge waste at each magnification

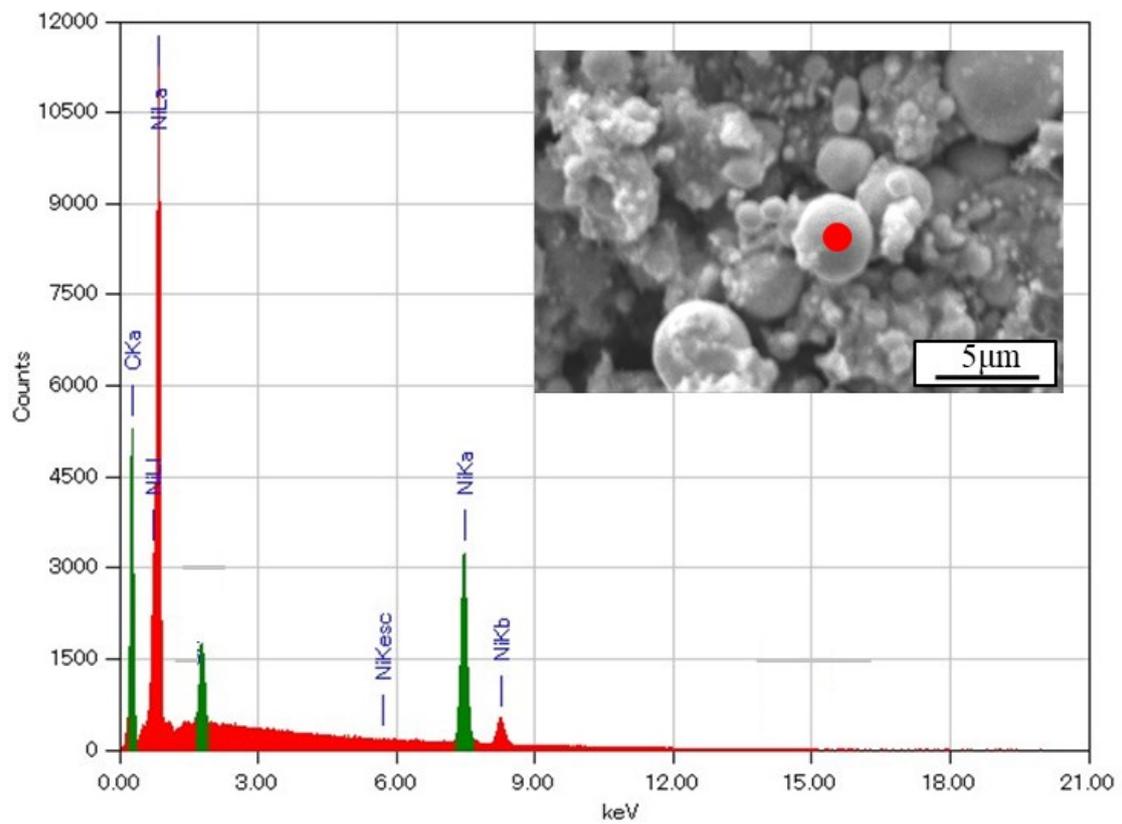


Fig.4.9 Spectrum analysis results of electric discharge waste

#### 4.1.2 極性を逆極性とした場合

加工液に油を用いて Ni に逆極性という加工条件での観察を行った。

放電痕の SEM 画像を図 4.10 に示す。(b)からわかるように表面状態は一様ではない。さらに高倍率で観察した(c)より、正極性と同様に滑らかな面と小さな粒が密集した粗い面が存在していることが確認できた。また(d)のような径 1~2  $\mu\text{m}$  程度の非常に小さな放電痕のようなものも確認できた。

放電痕の元素マッピング、スペクトル分析した結果を図 4.11, 図 4.12 に示す。これにより滑らかな面は母材である Ni によって形成された面であることがわかる。滑らかな面を取り囲む小さな粒は C であることがわかる。

タングステン加工電極の SEM 画像を図 4.13 に示す。小さな粒が密集した面のみで、金属と思われる滑らかな面は確認できなかつた。

加工電極のスペクトル分析結果を図 4.14 に示す。これまでの結果と同様に粒の密集した面は C であった。

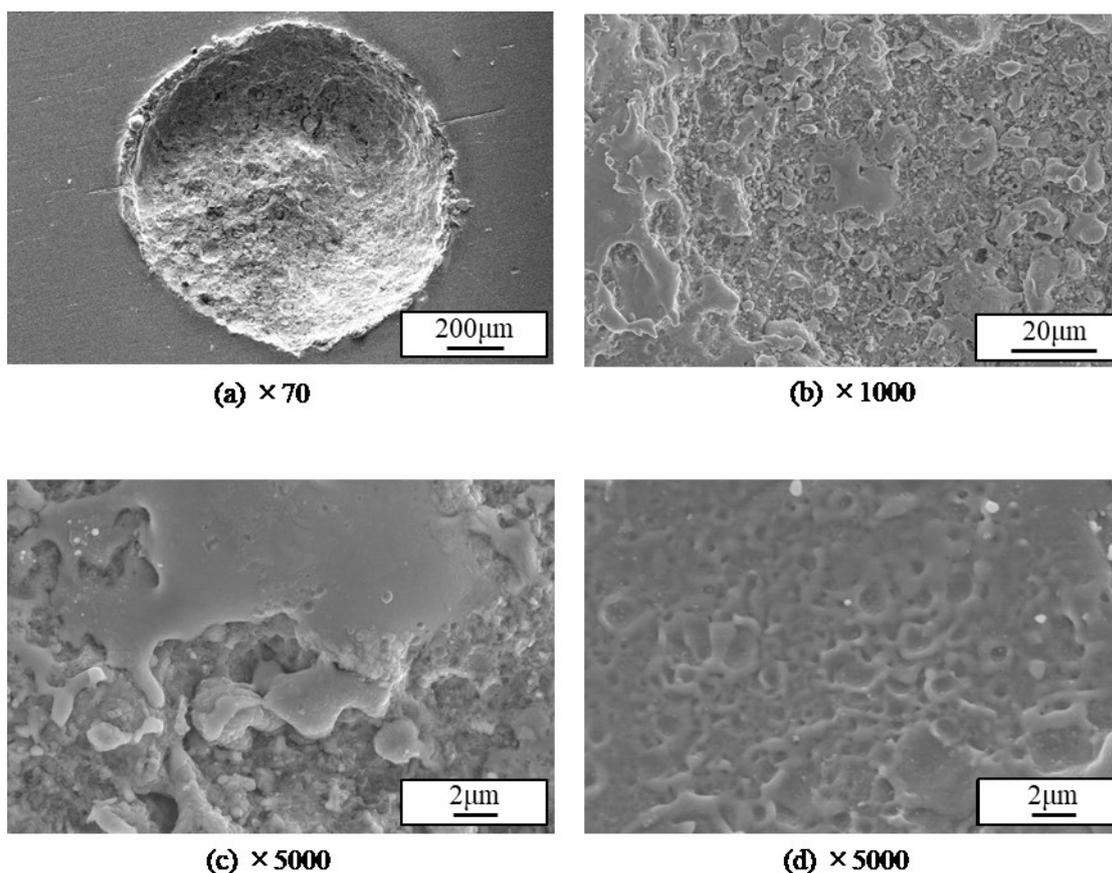


Fig.4.10 SEM image of the discharge crater surface at each magnification

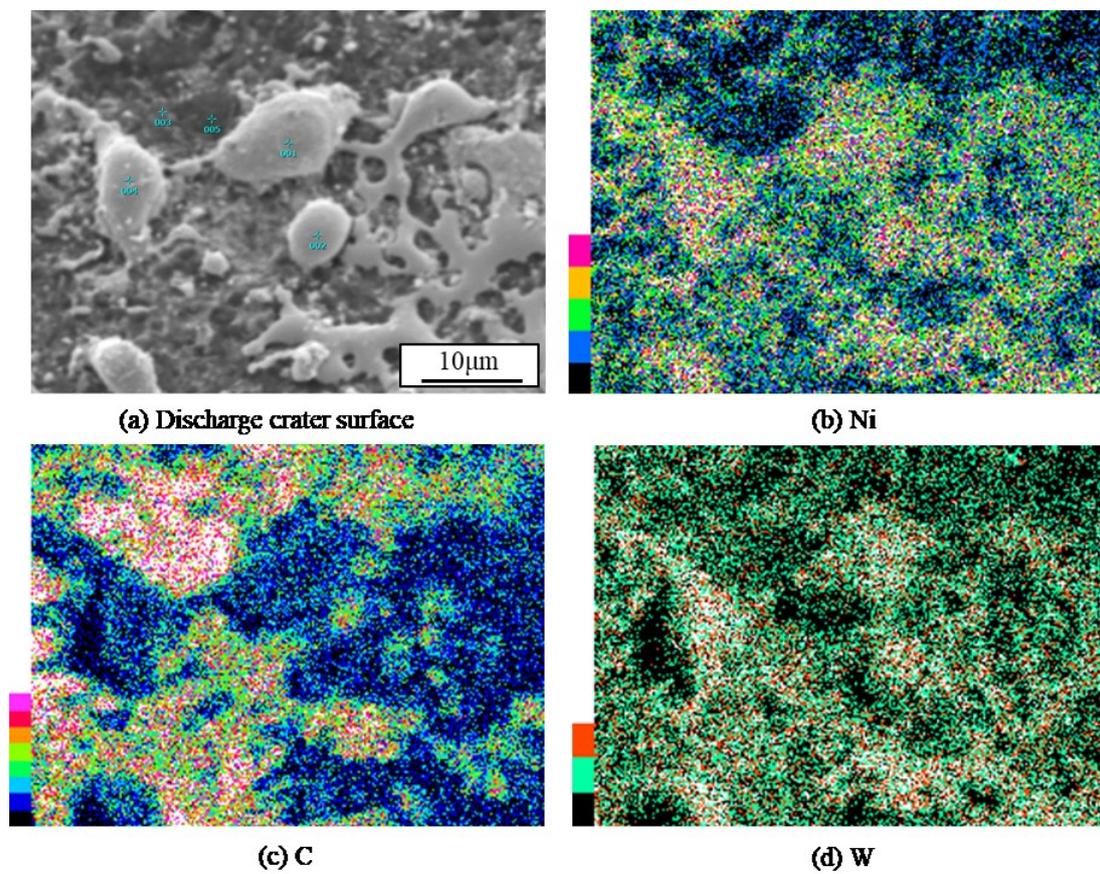
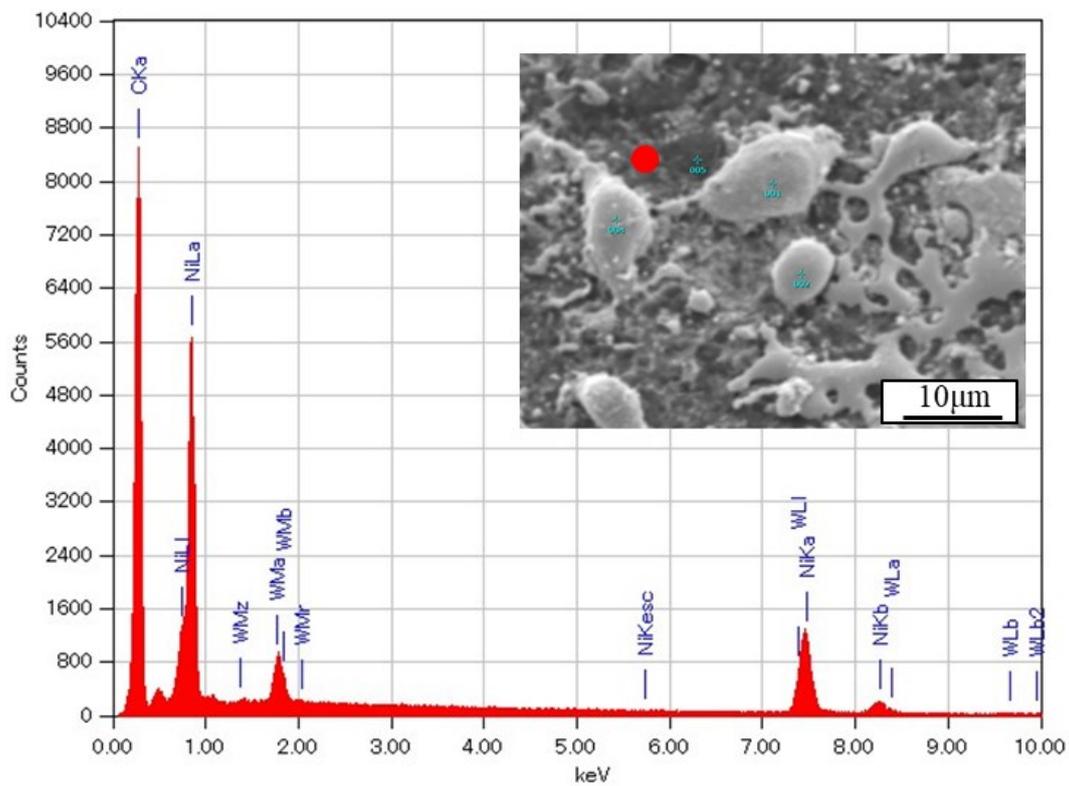
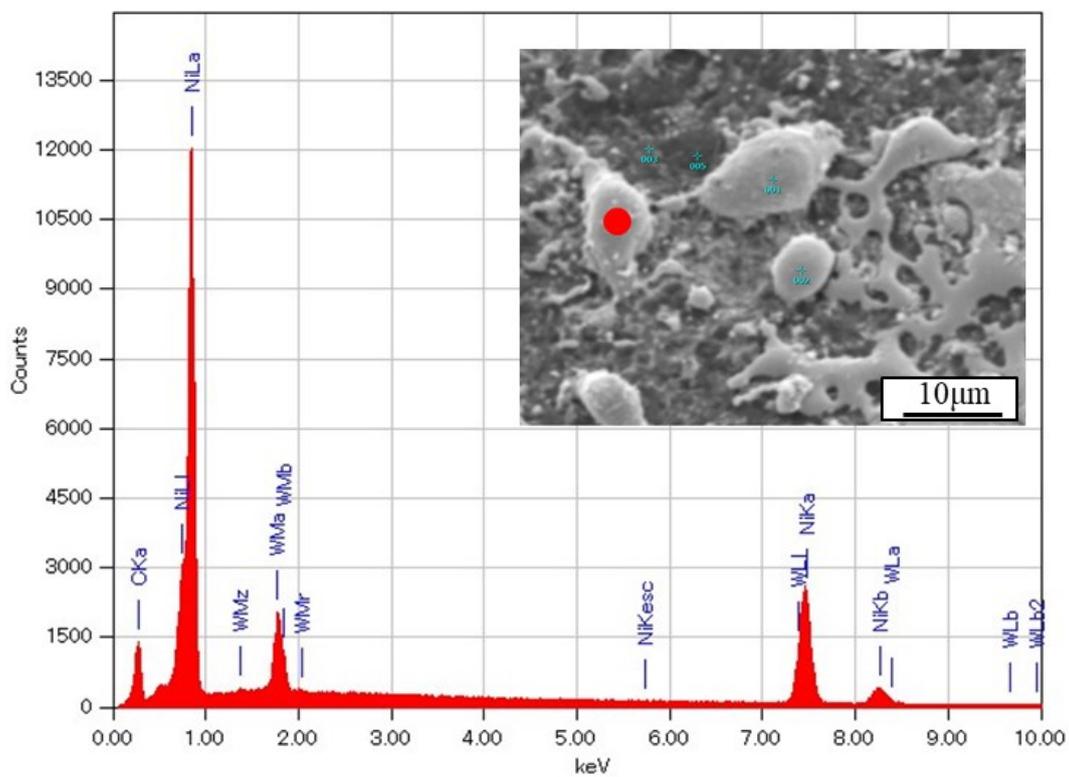


Fig4.11 Element mapping of the discharge crater surface



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.4.12 Spectrum analysis results of the discharge crater surface

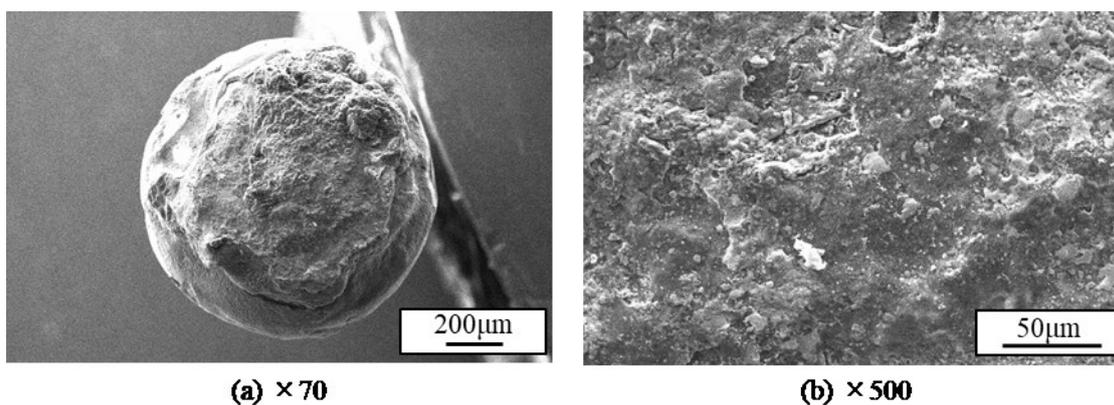


Fig.4.13 SEM images of the machining electrode surface at each magnification

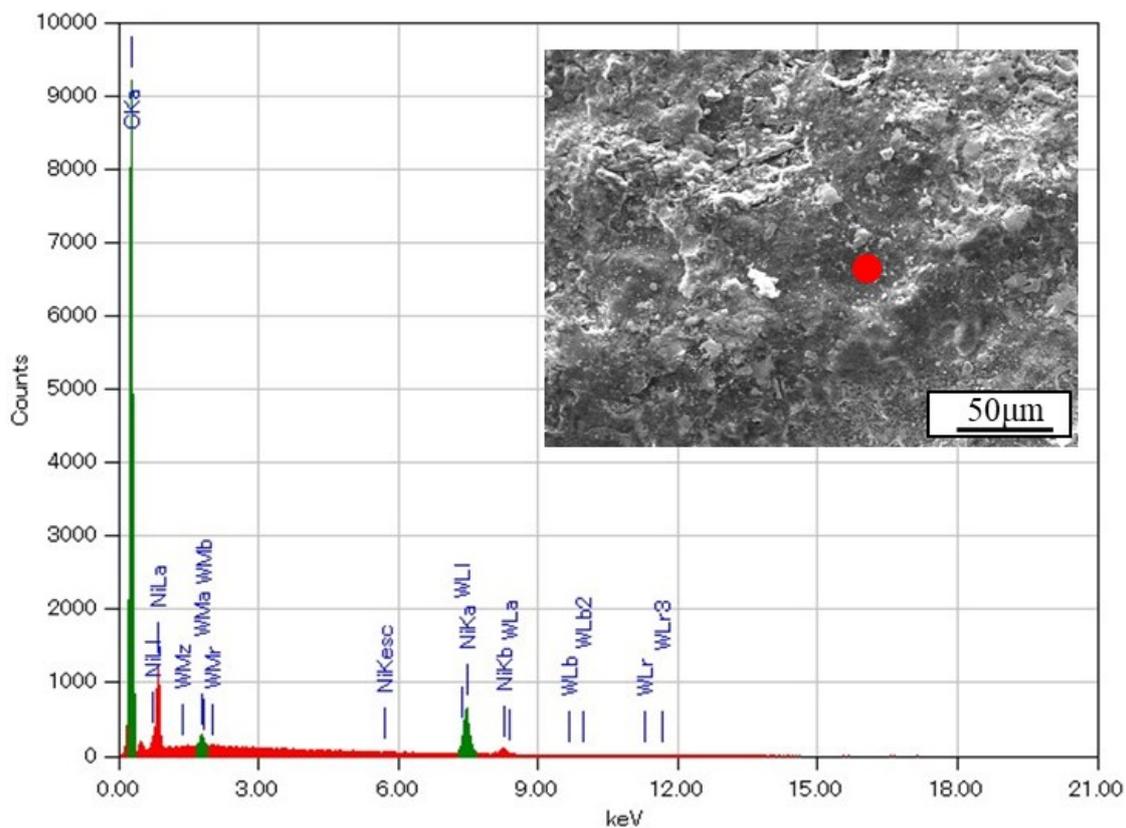


Fig.4.14 Spectrum analysis results of the machining electrode surface

## 4.2 加工液に水を用いた加工

### 4.2.1 極性を正極性とした場合

加工液に水を用いて Ni に正極性という加工条件での観察を行った。

放電痕の SEM 画像を図 4.15 に示す。油と異なり表面状態は一様であり、液体が飛散し凝固したような形状をしている。また、(d)のような球状の物体が付着していた。

放電痕の元素マッピング、スペクトル分析した結果を図 4.16, 図 4.17 に示す。これより、付着していた球体は Ni であり放電痕表面は Ni に加えて加工電極の W も含む異なった成分であることがわかる。

放電痕断面の元素マッピング、スペクトル分析結果を図 4.18, 図 4.19 に示す。20~30  $\mu\text{m}$  程度の層状のものが確認できた。この層は、放電痕表面と同様に W を含み、明らかに純ニッケル面とは違うものが生成された。

タングステン加工電極の SEM 画像、スペクトル分析結果を図 4.20, 図 4.21 に示す。これらより加工電極表面は母材である W であることがわかる。

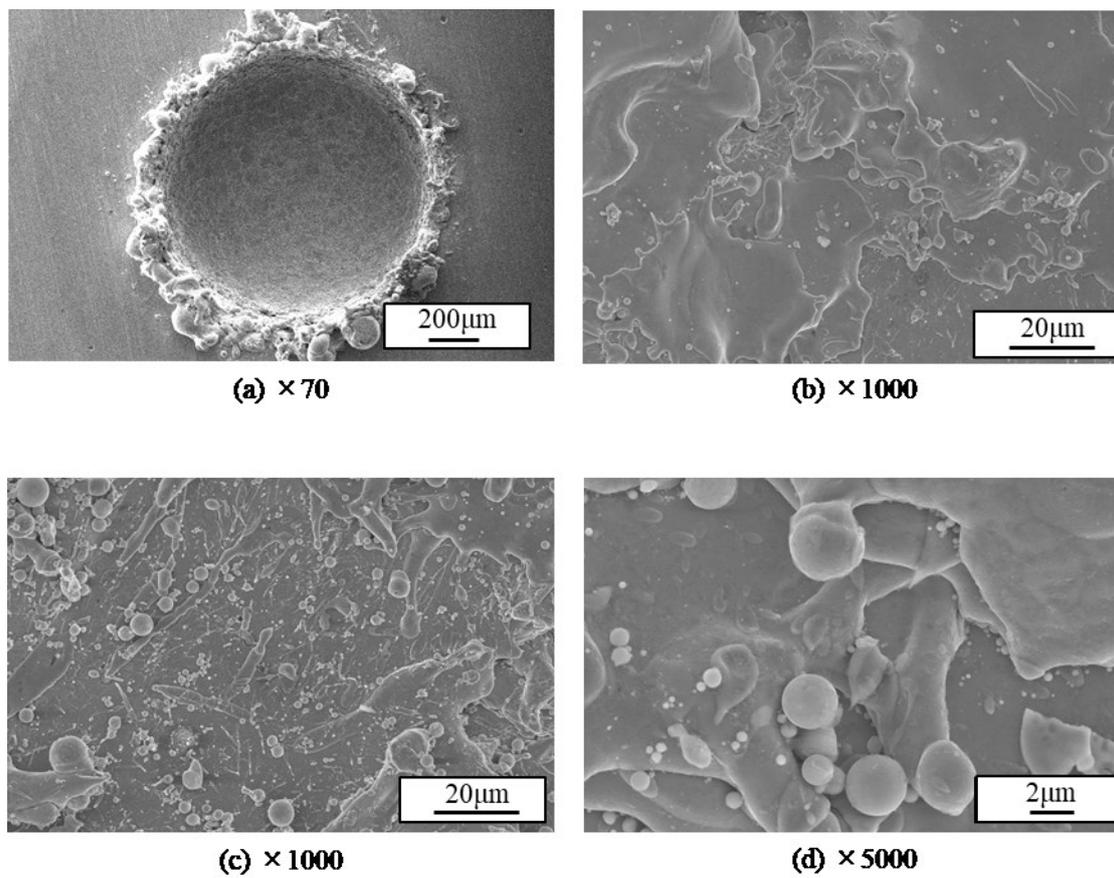


Fig.4.15 SEM image of the discharge crater surface at each magnification

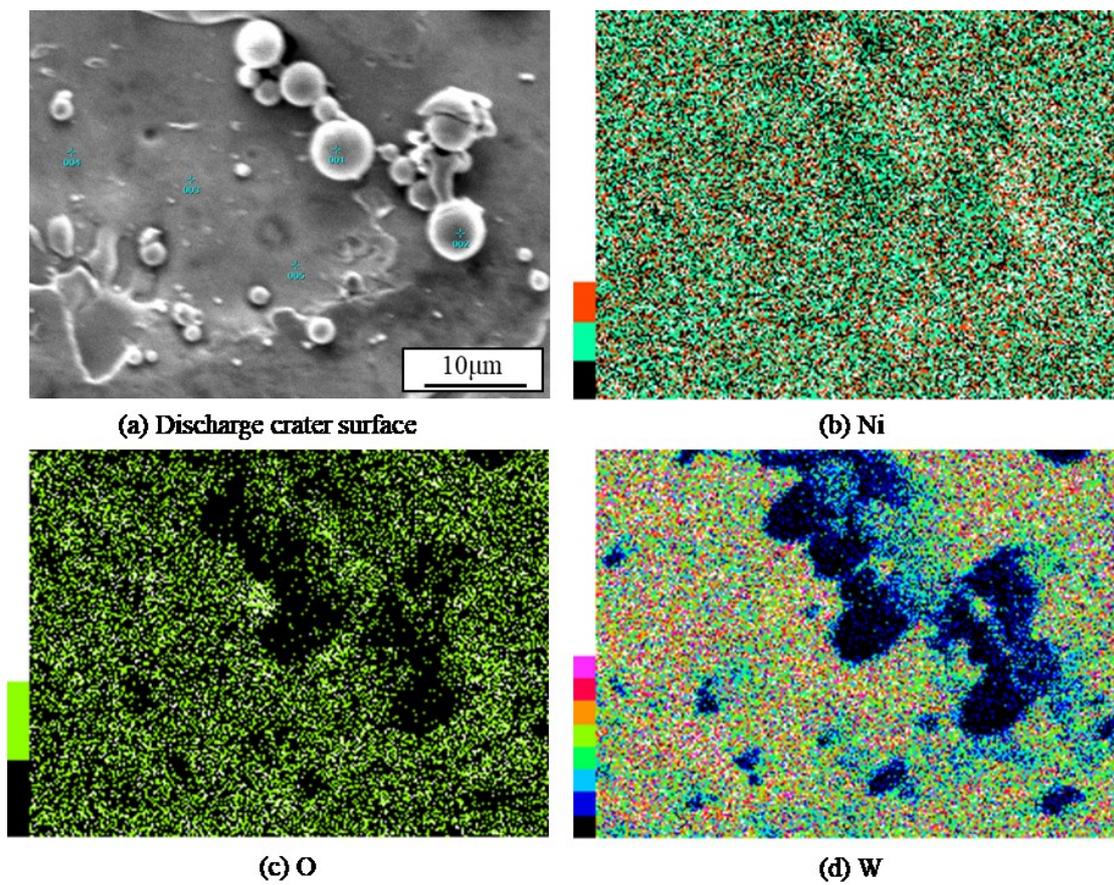
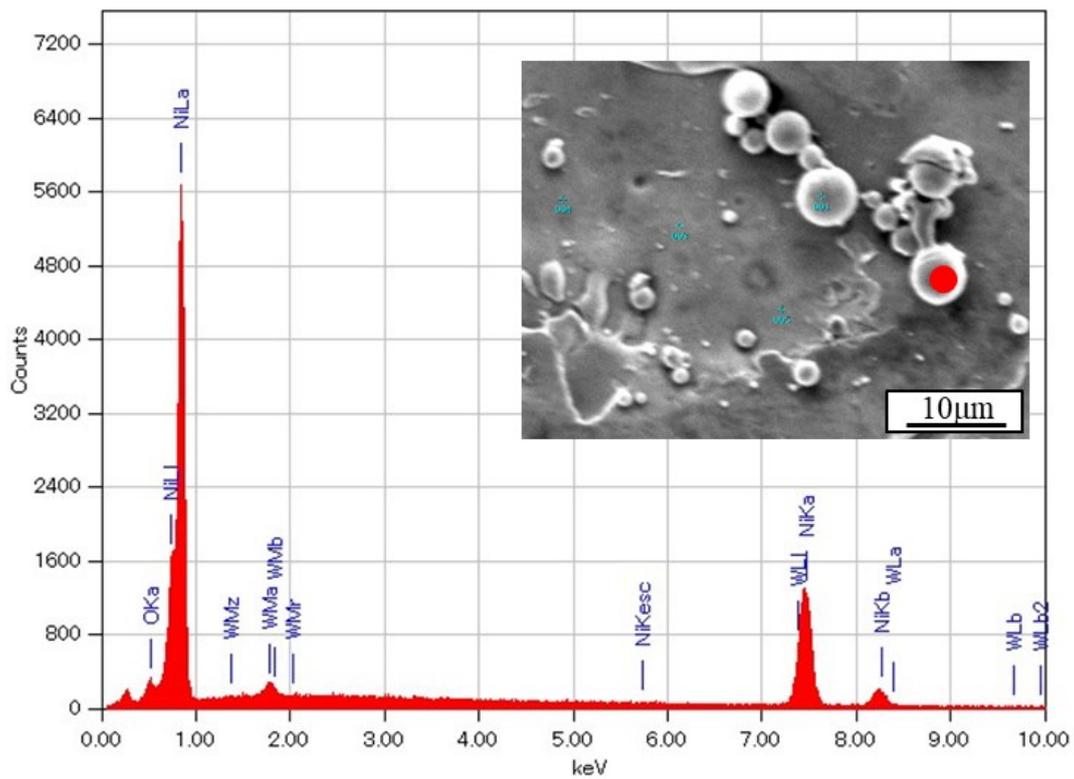
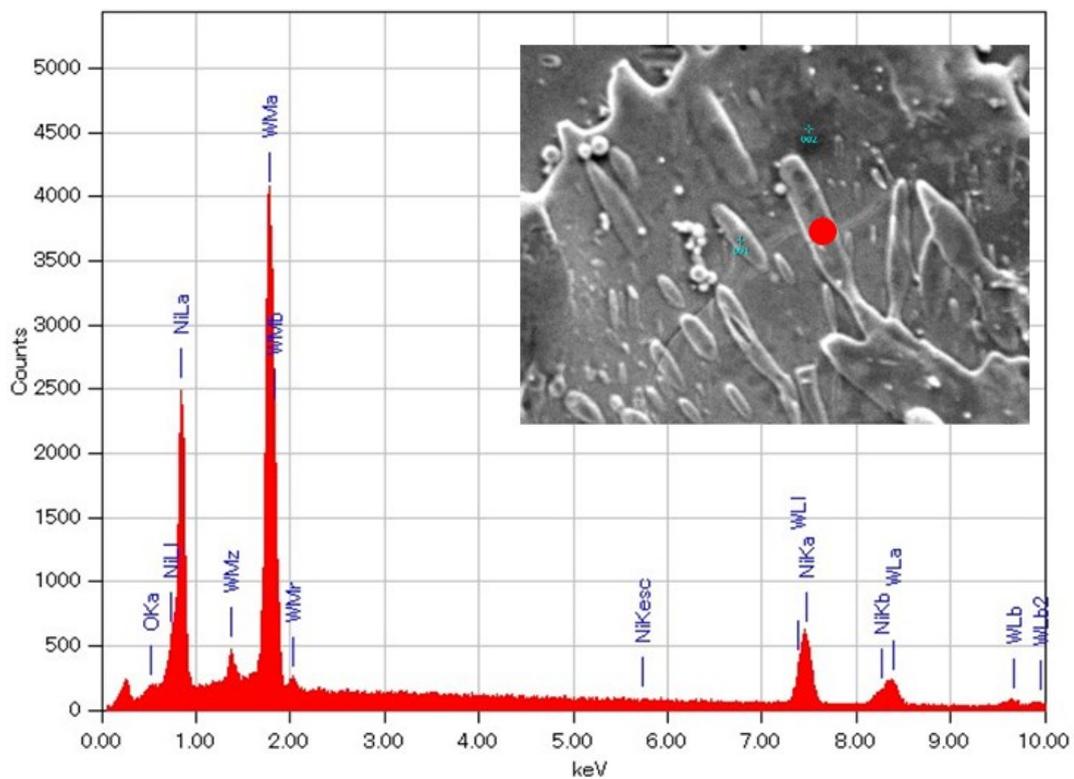


Fig.4.16 Element mapping of the discharge crater surface



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.4.17 Spectrum analysis results of the discharge crater surface

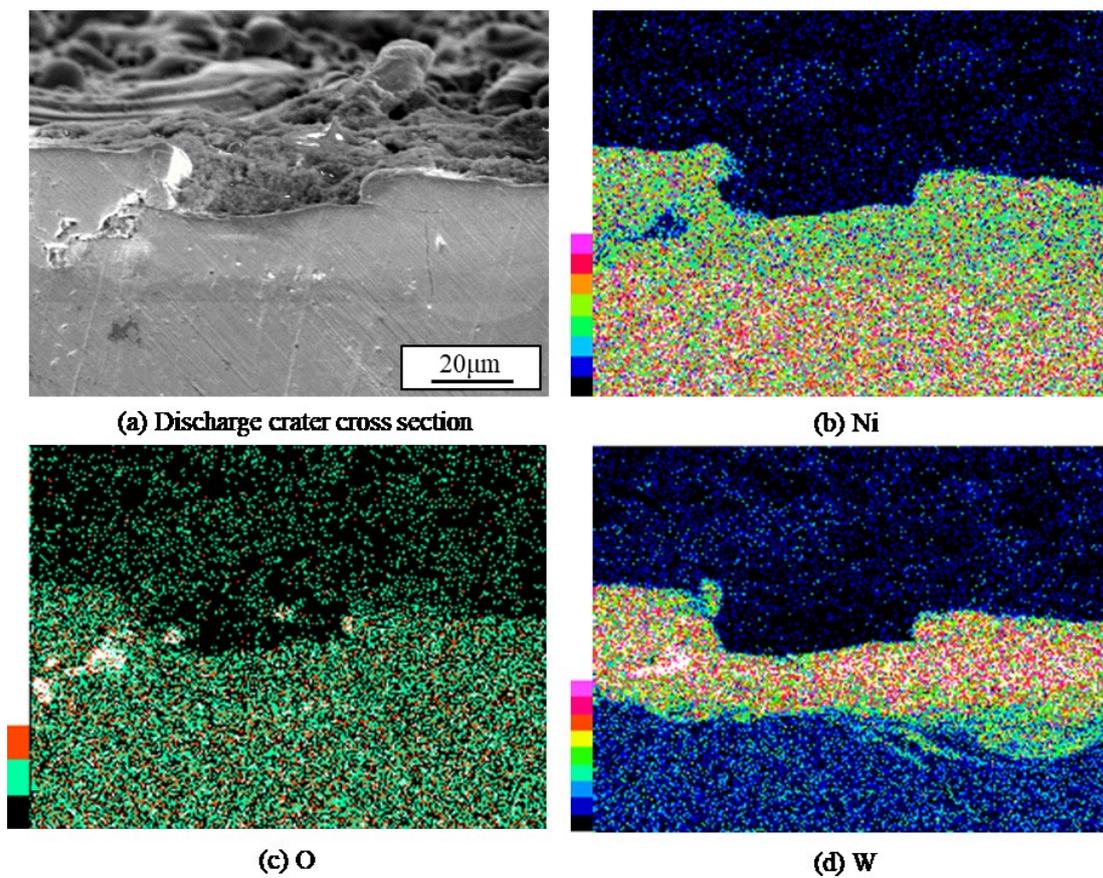
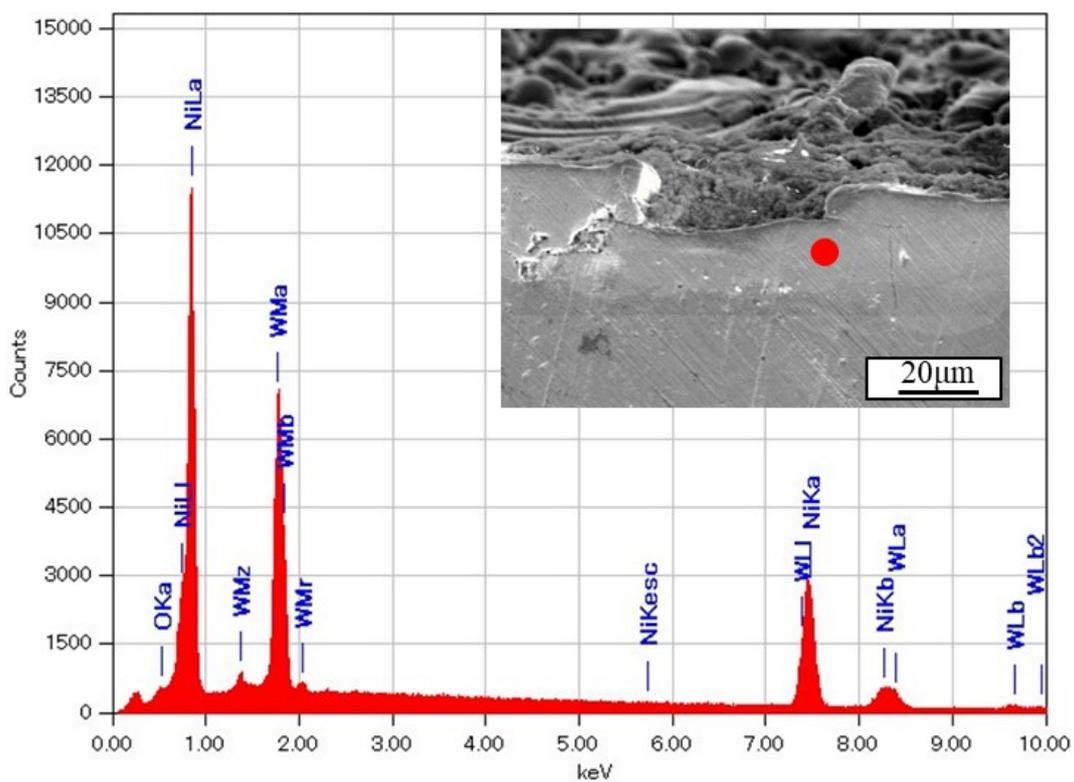
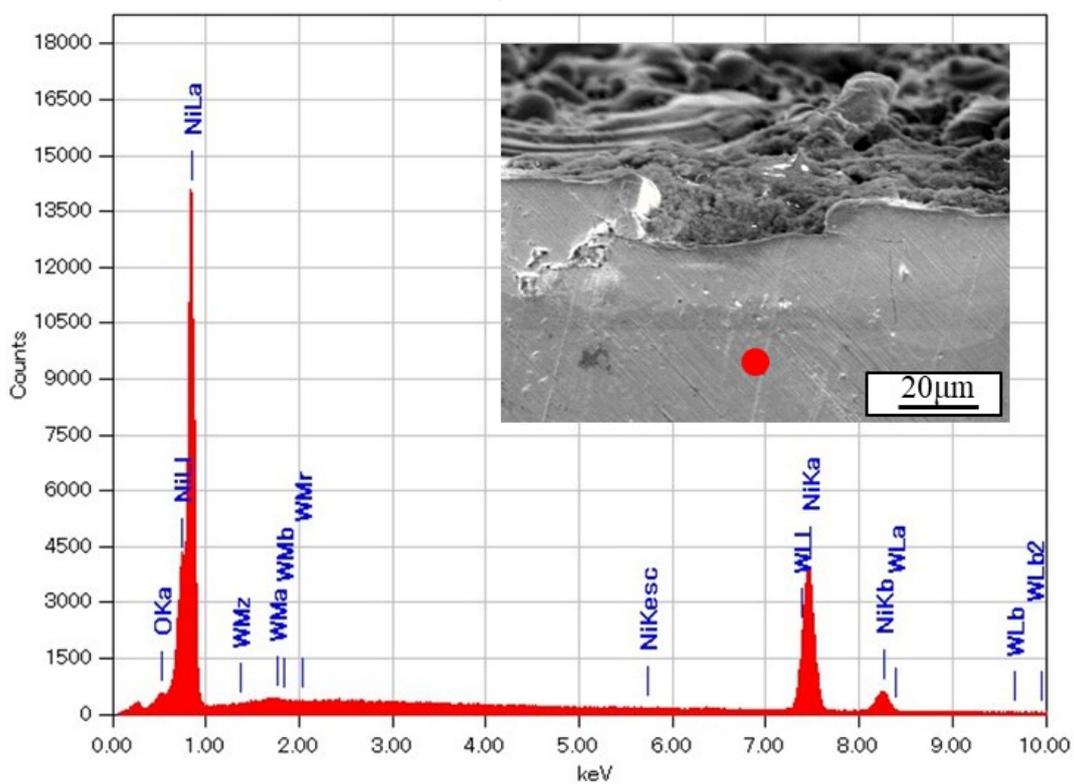


Fig.4.18 Element mapping of the discharge crater cross section



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.4.19 Spectrum analysis results of the discharge crater cross section

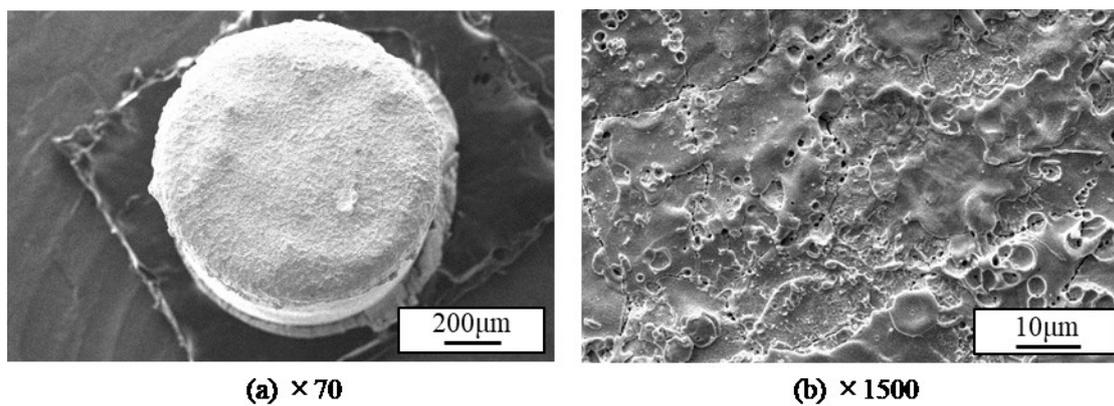


Fig.4.20 SEM images of the machining electrode surface at each magnification

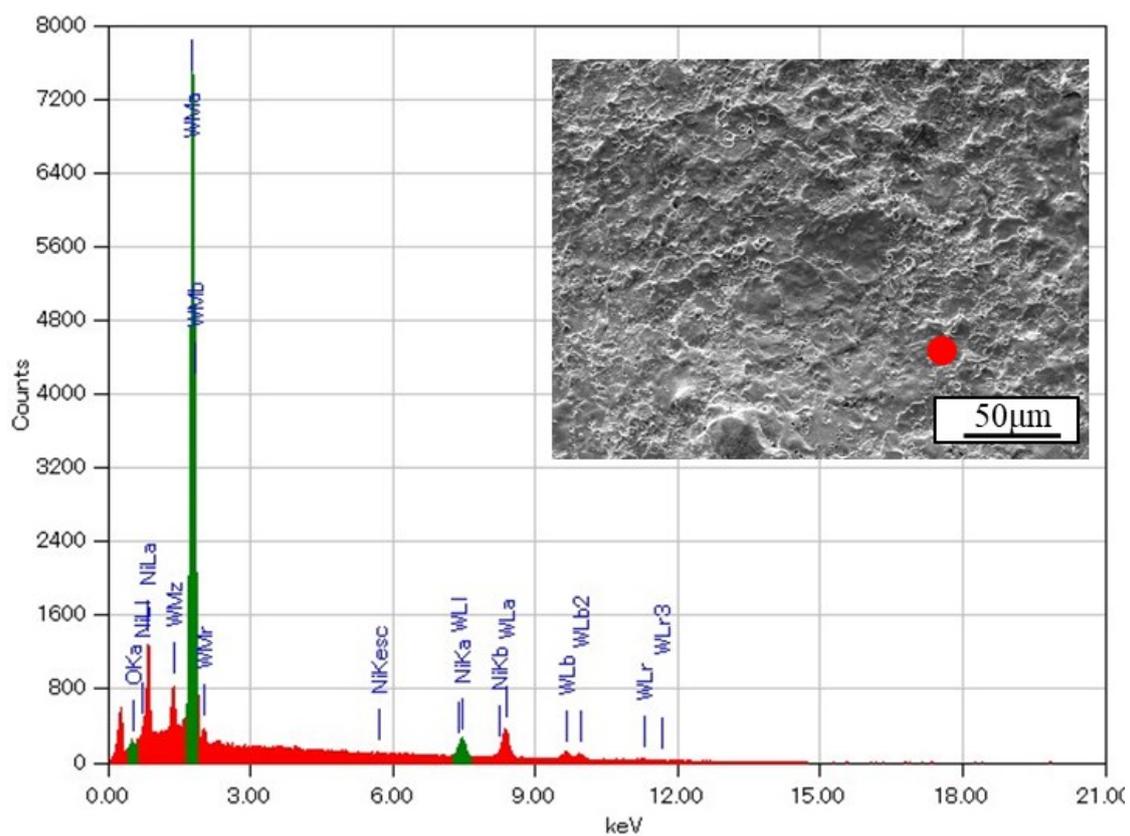


Fig.4.21 Spectrum analysis results of the machining electrode surface

#### 4.2.2 極性を逆極性とした場合

加工液に水を用いて Ni に逆極性という加工条件での観察を行った。

放電痕の SEM 画像，スペクトル分析した結果を図 4.22，図 4.23 に示す。正極性と同様に，液体が飛散し凝固したような形状をしており，母材の Ni に加えて加工電極の W も含むことがわかる。加工表面には放電痕と思われる 2 μm 前後のクレーター，そしてクラックが確認された。

放電痕断面の元素マッピング，スペクトル分析結果を図 4.24，図 4.25 に示す。20～30 μm 程度の層状のものが確認できた。この層は，放電痕表面と同様に W を含み，明らかに純ニッケル面とは違うものが生成された。

タンゲステン加工電極の SEM 画像，スペクトル分析結果を図 4.25，図 4.26 に示す。これらより加工電極表面には放電痕表面と同様の Ni，W を含むことがわかる。

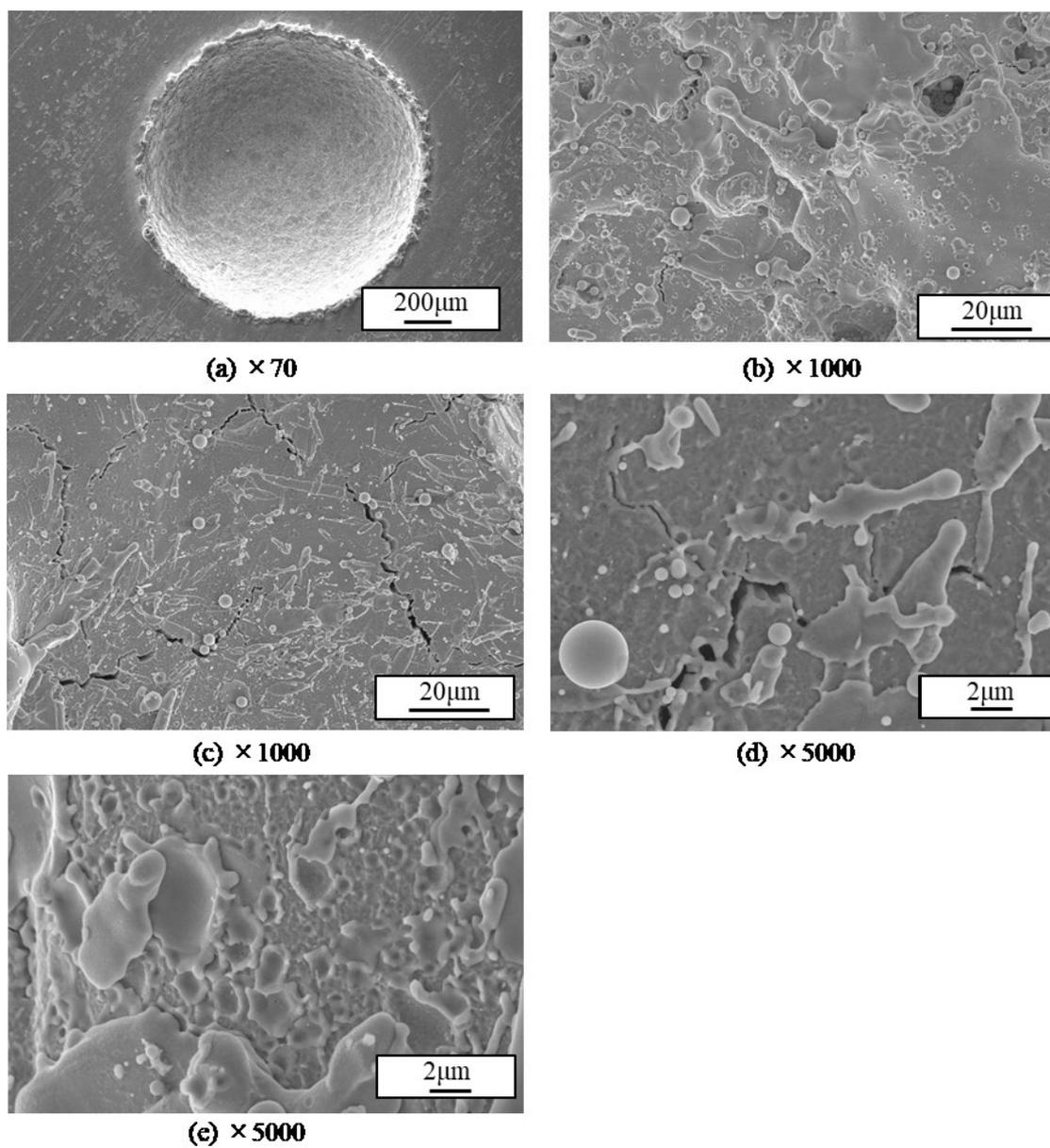


Fig.4.22 SEM image of the discharge crater surface at each magnification

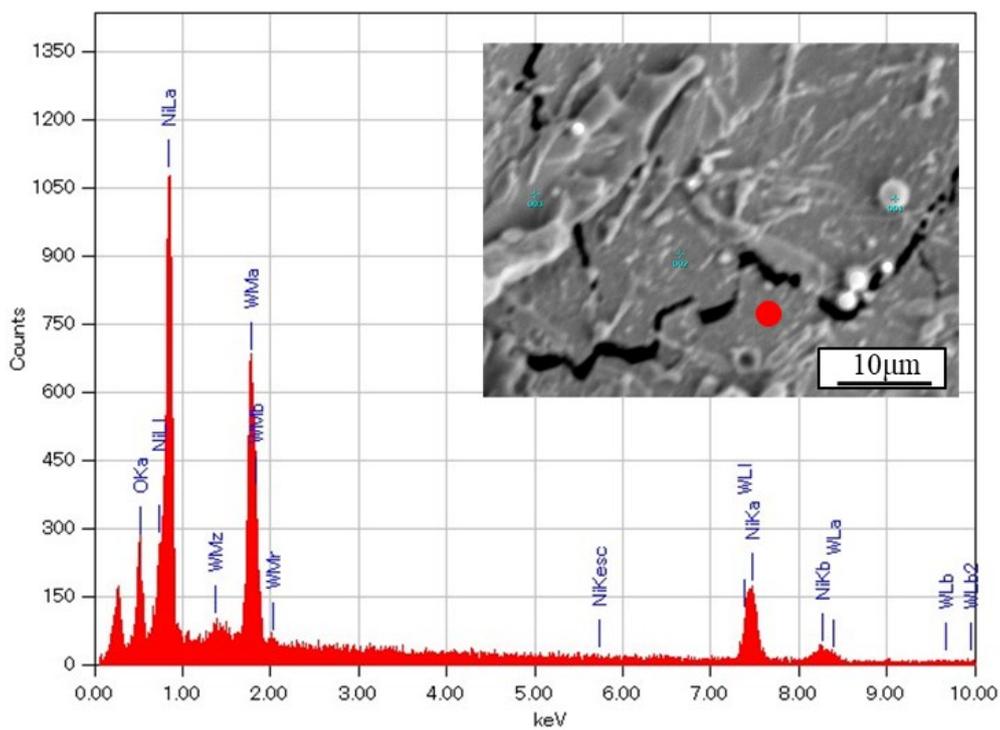


Fig.4.23 Spectrum analysis results of the discharge crater surface

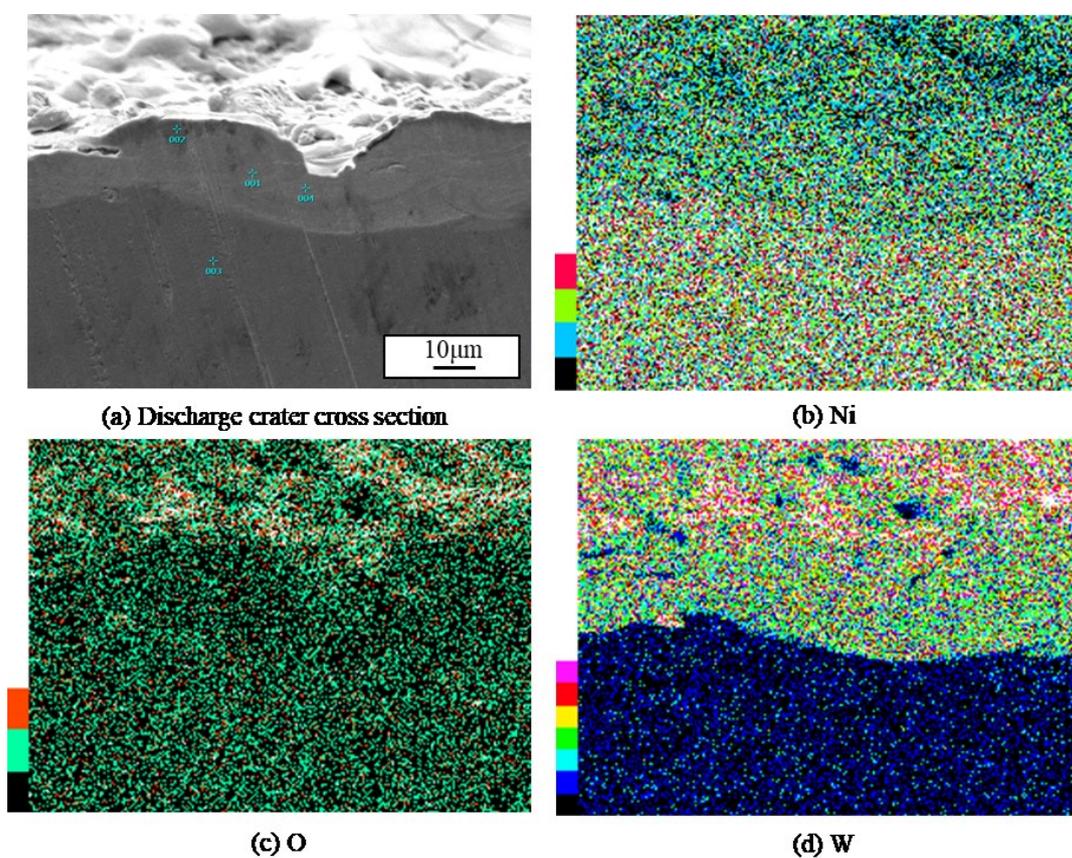
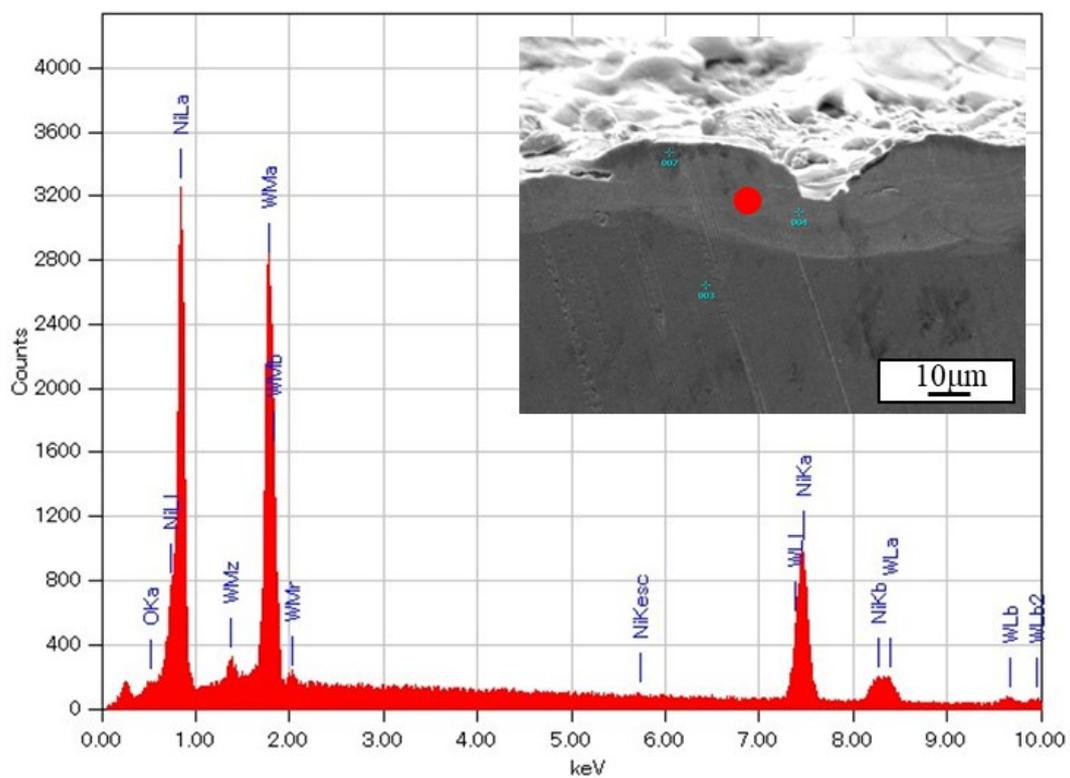
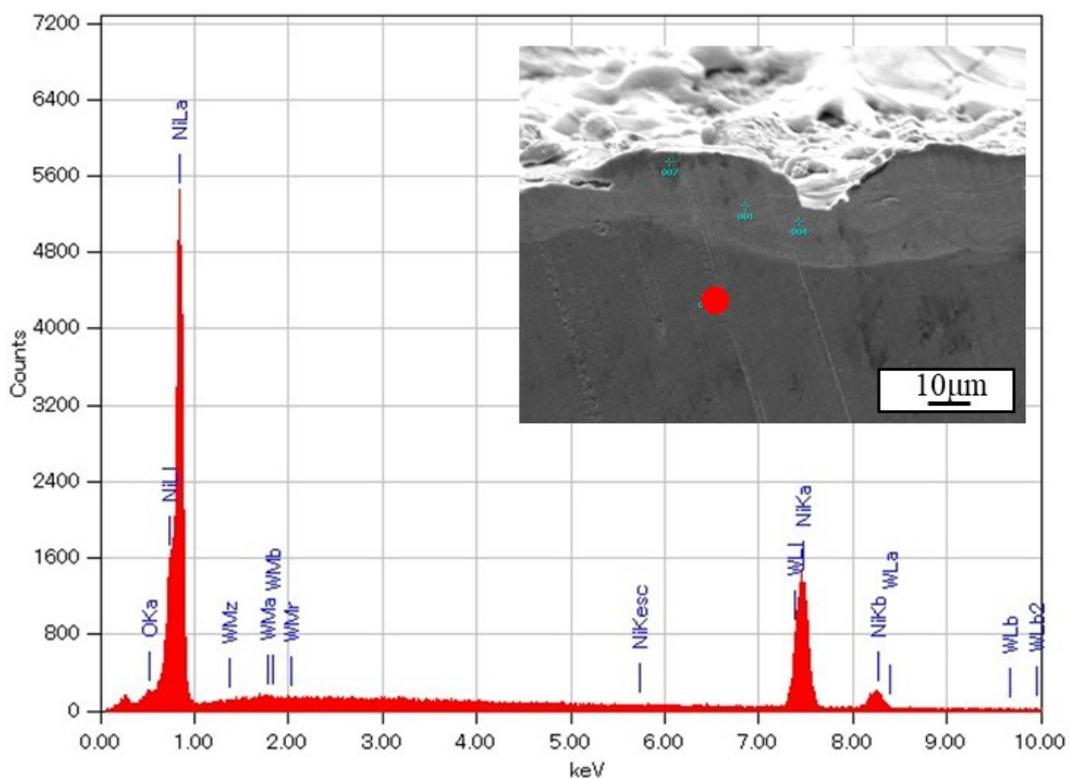


Fig.4.24 Element mapping of the discharge crater cross section



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.4.25 Spectrum analysis results of the discharge crater cross section

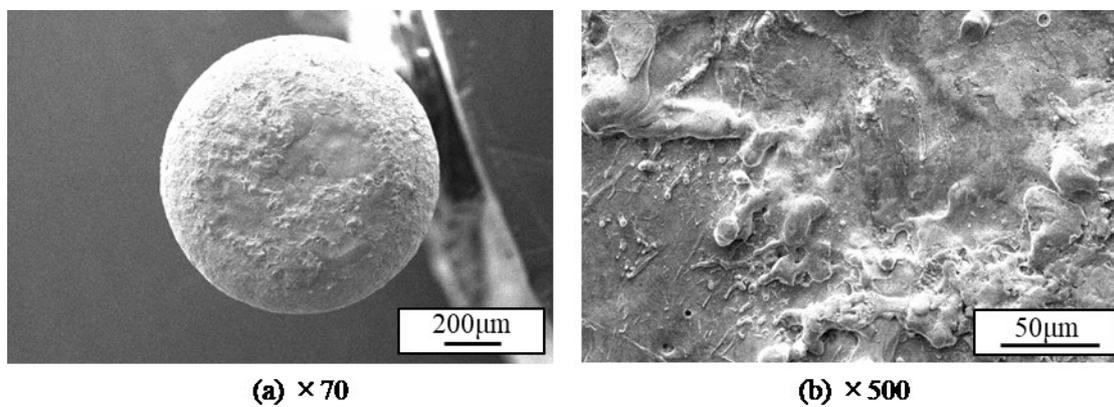


Fig.4.26 SEM images of the machining electrode surface at each magnification

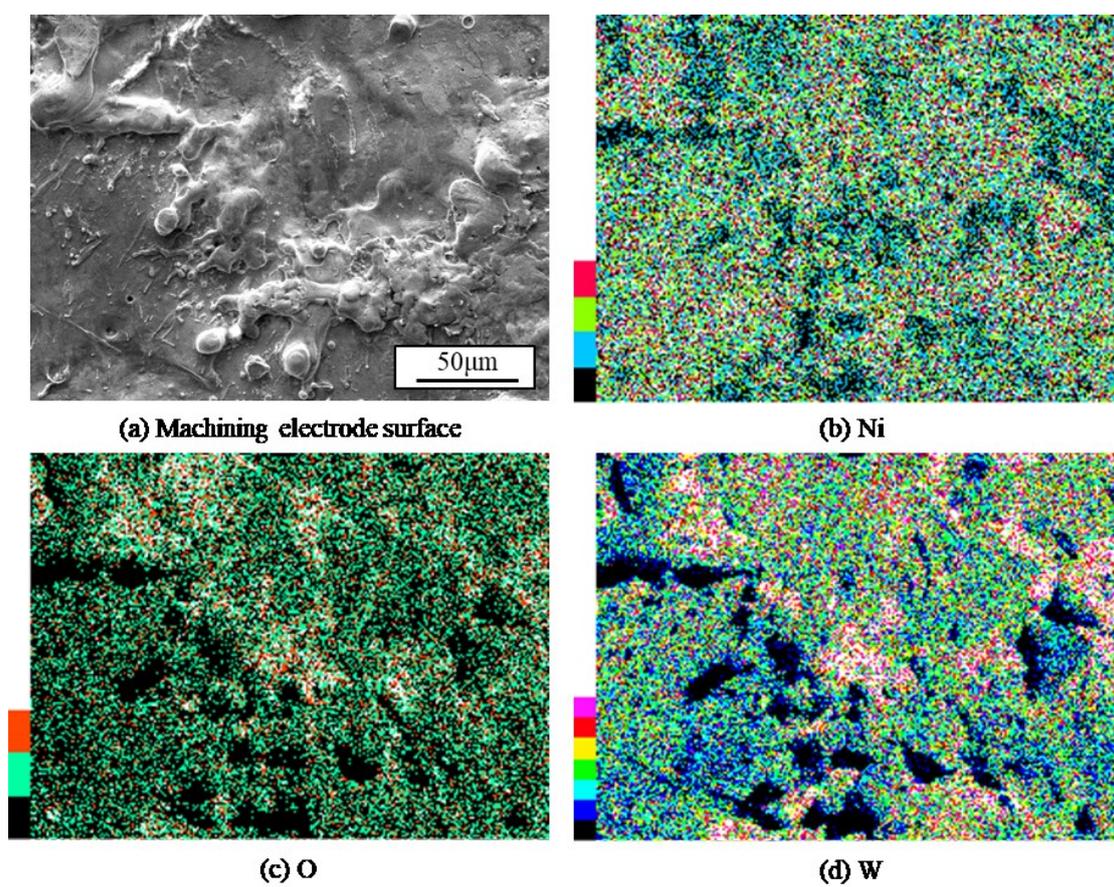
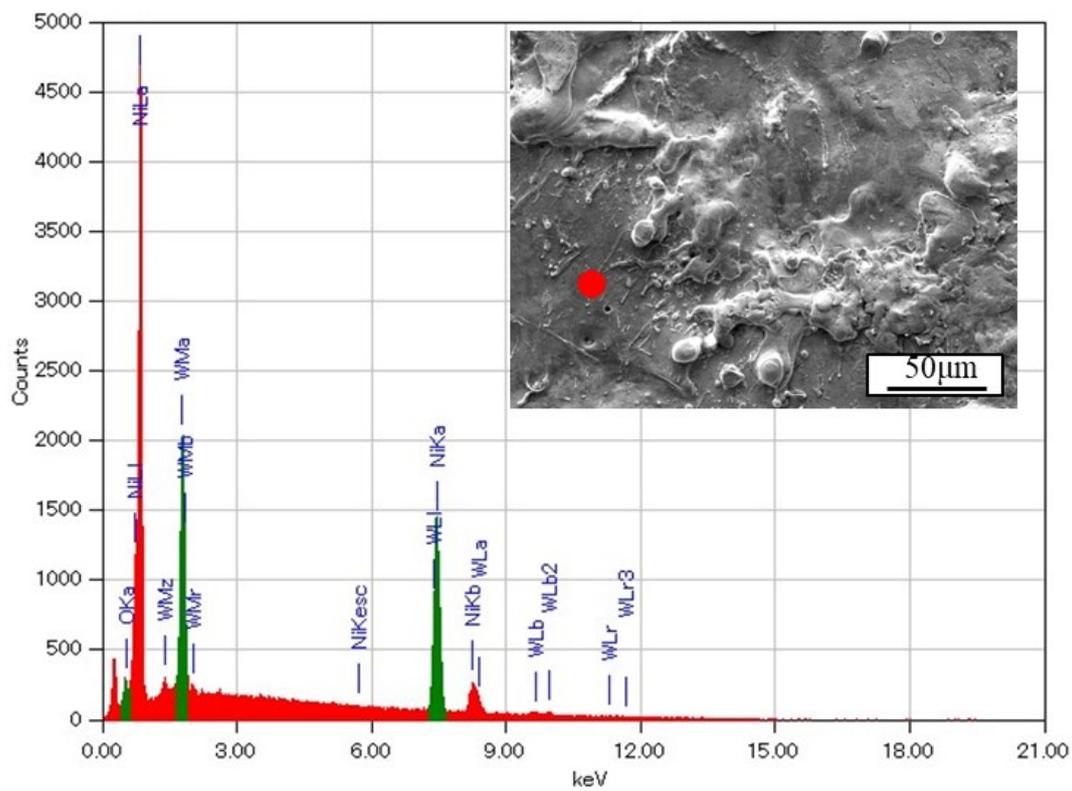
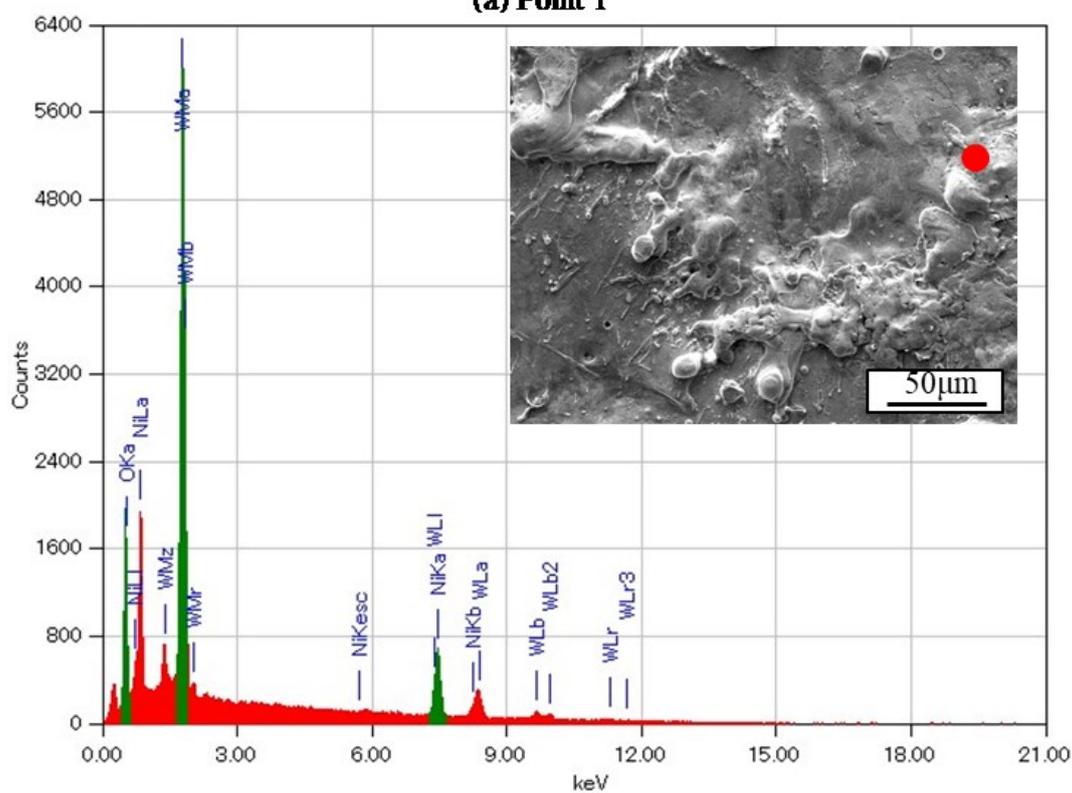


Fig.4.27 Element mapping of the machining electrode surface



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.4.28 Spectrum analysis results of the machining electrode surface

### 4.3 考察

加工液に油を用いた放電加工では SEM 画像により極性に関わらず、放電痕表面には滑らかな面と小さな粒が密集した粗い面が存在し、元素マッピング、スペクトル分析により滑らかな面は母材である Ni、粗い面は加工油の成分である C が存在していることがわかった。加工電極にも同様の C の粒が密集した面が確認できた。これらの C は加工液の成分が放電により分解され炭素やタールとなったものが付着したと考えられる。

図 4.3 の 20~30  $\mu\text{m}$  程度の層状のものは溶融再凝固層だと考えられる。主成分は Ni で少量の C を含み、薄く何層にも重なっていた。いったん溶融した金属が再凝固する時に白層を形成し、白層部分の下部にも溶融までは至らないものの放電エネルギーにより母材と性質の異なる熱影響層が生じることが知られているが、今回 SEM 画像とスペクトル分析では熱影響層を確認することはできなかった。

図 4.8 の加工屑の SEM 画像から、4, 5  $\mu\text{m}$  程の大きさの加工屑が多く観察され、大きくても 10  $\mu\text{m}$  程度であり非常に微細な加工がされていることがわかる。ある加工屑の研究においては粒径が 2~50  $\mu\text{m}$  前後の範囲で分布しており<sup>12)</sup>、比較しても今回観察できたものは非常に小さい。これは、低電圧により一度の放電における除去量が微小であることが原因だと考えられる。形状については、球状の加工屑が多く観察された。球状の加工屑は被加工物表面および工具電極表面から蒸発した金属が放電柱の中で衝突しながら成長していき、加工液によって冷却されて液滴となったとき、表面張力によって球状になるという過程によって生成されるものだと考えられている。加工屑からも Ni と C が確認できたが加工液中で Ni の球体に C が付着したと考えられる。

以上の結果より加工液に油を用いた Ni の放電加工における表面層形成メカニズムの考察をする。推定した表面層形成メカニズムを図 29 に示す。

放電が発生し高温となり熱分解によって油から C が生成され放電痕表面に付着する。その上から溶融した Ni が覆いかぶさるが、濡れ性がないため分かれて存在する。その後、その近辺で放電が起こることで先ほどできた面の上にさらに C が付着、そこに液体の Ni が覆いかぶさる。これを繰り返すことにより図 4.3(b)のような Ni と C が混在し、何層にも重なった溶融再凝固層になるのではないかと考えられる。加工電極側には Ni が付着していないが、これは濡れ性がないことで電極に付着した C にはじかれているのではないかと考えられる。

加工液に水を用いた放電加工では SEM 画像により放電痕表面層は全体的に液体が飛散し再凝固したと思われる。スペクトル分析により母材である Ni だけでなく、加工電極である W を多く含むことがわかった。加工液を油とした場合には表面にあまり W が確認されていないことから、加工液に水を利用したことによる特性だと考えられる。水には酸素が含まれているため、タングステンと結合し酸化タングステンとなったことが原因だと考える。タングステンの融点は 3422  $^{\circ}\text{C}$  であるのに対し、酸化タングステンの融点は 1473  $^{\circ}\text{C}$  と半分以下になる。また、ニッケルの融点は 1455  $^{\circ}\text{C}$  であり酸化タングステンの融点と非常に近

い。放電痕表面層や断面を見ても Ni と W が分かれて存在することが確認できないため固溶体を形成したのではないかと考えられる。溶融層は、その材料の微細な鑄造組織となるのが普通である。しかし、異常な高温の溶融状態から急冷を受けるために、溶融層には異常組織を生ずることがあるといわれている。その一つとして、相の平衡状態が変化することで、特に均一な固溶体(過飽和ないし強制固溶体)を生じやすいという報告もある<sup>13)</sup>。

表面には図 4.22 のようなクラックも確認された。これは加工後に引き起こる水素脆性によるものではないかと考えられる。素材表面で水素の生成が起きれば、水素脆性の危険があるといえる。放電加工におけるクラックの発生は好ましくない。

また、放電痕表面には 2  $\mu\text{m}$  前後の加工層のような球体が確認された。この球体は W を含んでおらず純ニッケルであり、固溶体と思われる放電痕表面の成分とは異なる。この加工層は加工面と接している点のみが溶融し、接着されている。放電終了後、放電痕表面の温度が下がりきる前に付着した加工層が溶けて固まったのではないかと考えられる。

極性で比較をすると、成分において大きな違いはなかった。しかし、2.2 で示したように材料除去メカニズムが違うことから表面形状に差が出た。油において正極性では、一度に広範囲の材料が除去されることから一つ一つの塊が大きい。一方逆極性では、小さなスポットに高エネルギーを当てた蒸発による除去がメインになるため、正極性と比べて微細な加工がされている。水においては W が溶融してしまうためか除去量に関する大きな差は見られなかった。

また、正極性の加工電極、逆極性の被加工物に当たる負極側では図 4.22(e) のような 2  $\mu\text{m}$  前後の非常に小さな放電痕と思われるクレーターが確認されていることから、やはり逆極性において微細な加工が行われていると考えられる。

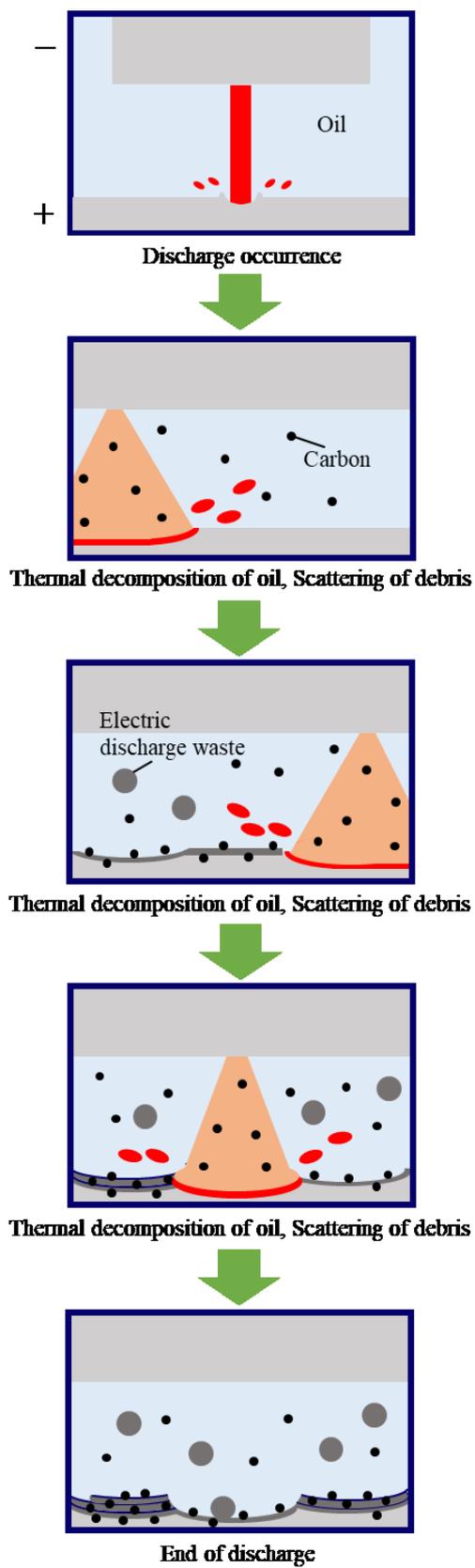


Fig.4.29 Model of surface layer formation mechanism

## 5 AI に対する放電加工実験

### 5.1 加工液に油を用いた加工

#### 5.1.1 極性を正極性とした場合

加工液に油を用いて AI に正極性という加工条件での観察を行った。

放電痕の SEM 画像，スペクトル分析した結果を図 5.1，図 5.2 に示す。熔融し凝固したと思われる母材成分の AI が広範囲に確認され，所により小さな粒となり密集した C が確認された。

放電痕断面の SEM 画像を図 5.3 に示す。(b)からわかるように，50  $\mu\text{m}$  程度の層状のものが確認できた。

放電痕断面の元素マッピング，スペクトル分析結果を図 5.4，図 5.5 に示す。この層は母材である AI であることがわかった。

タングステン加工電極の SEM 画像，スペクトル分析結果を図 5.6，図 5.7 に示す。表面は被加工物である AI によって覆いつくされていた。

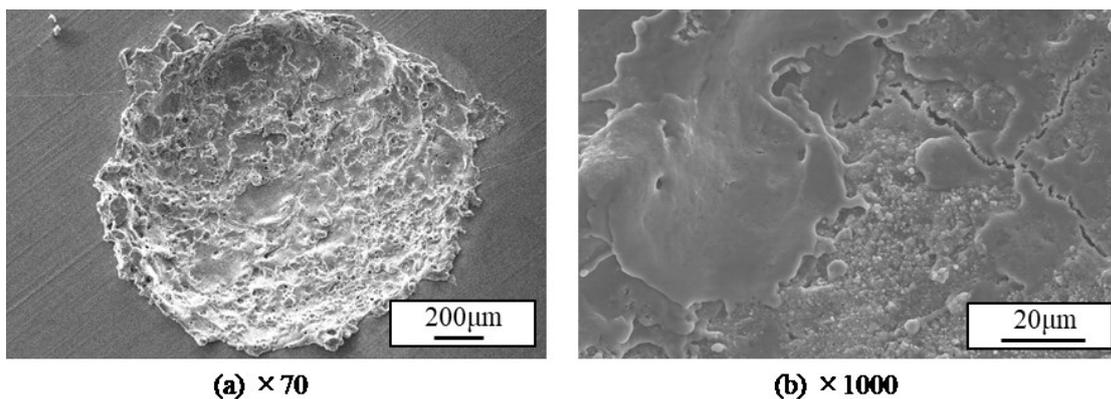
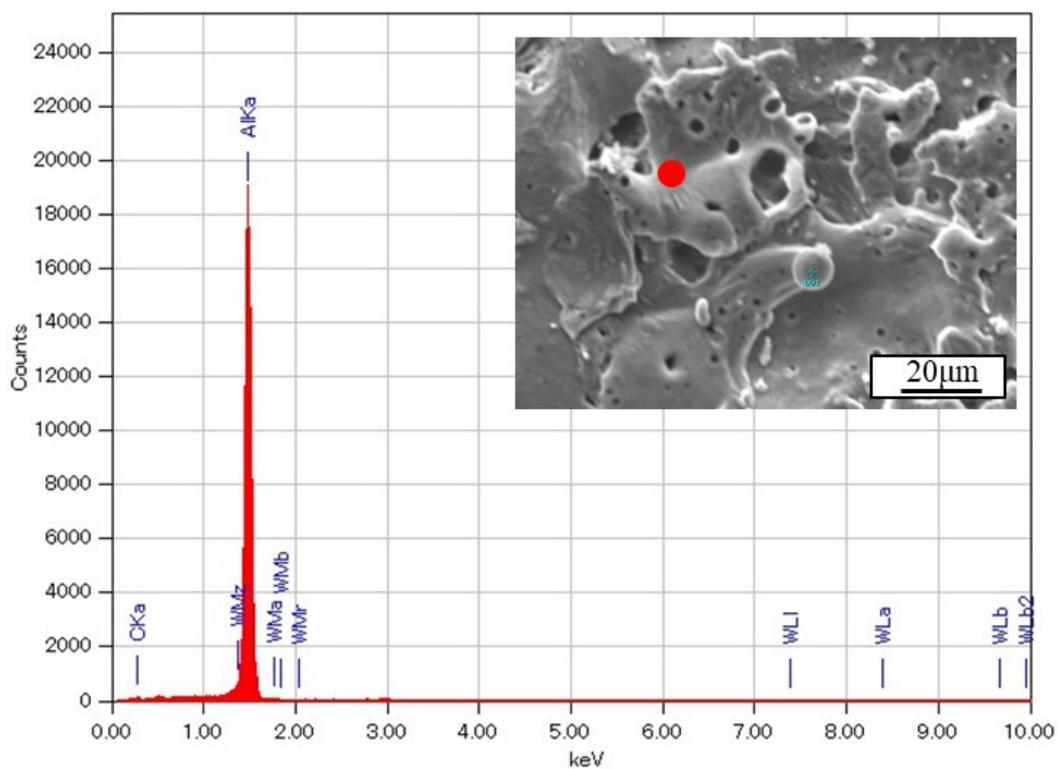
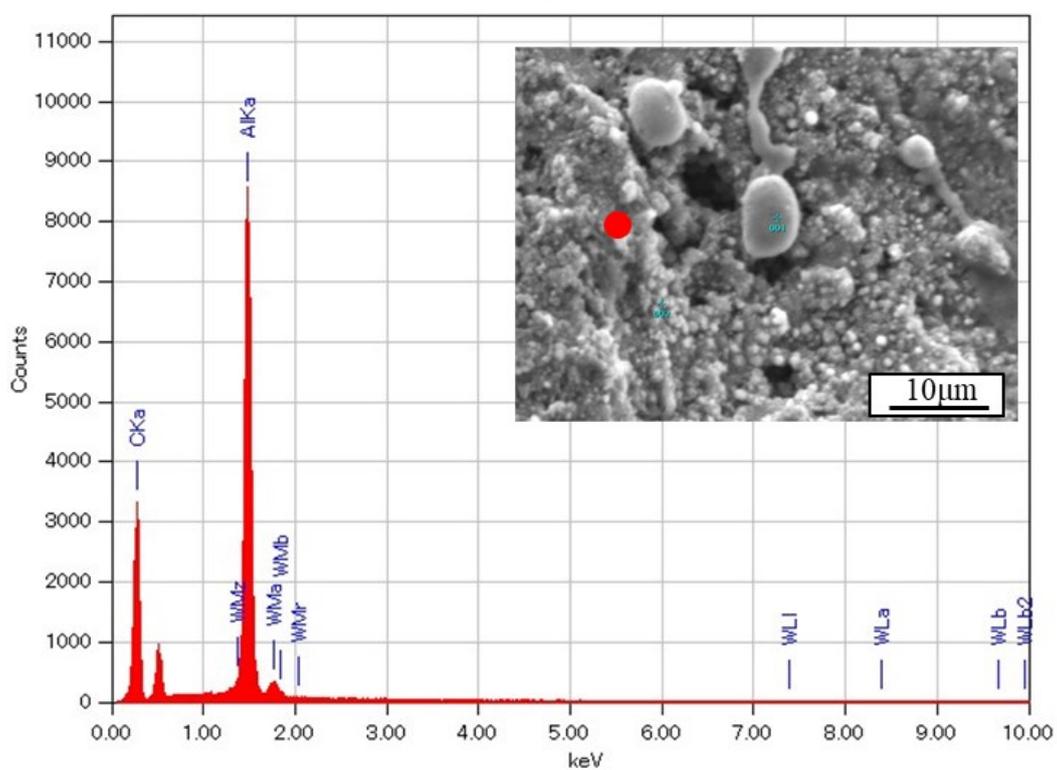


Fig.5.1 SEM image of the discharge crater surface at each magnification



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.5.2 Spectrum analysis results of the discharge crater surface

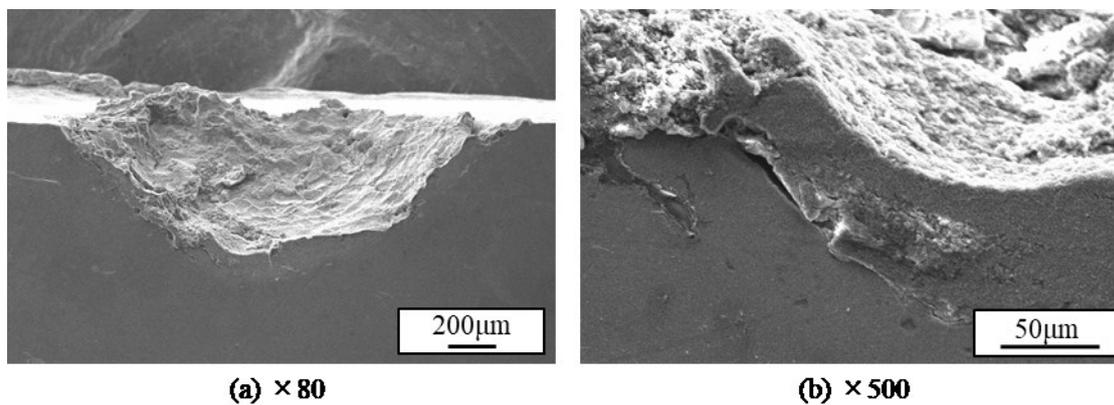


Fig.5.3 SEM image of the discharge crater cross section at each magnification

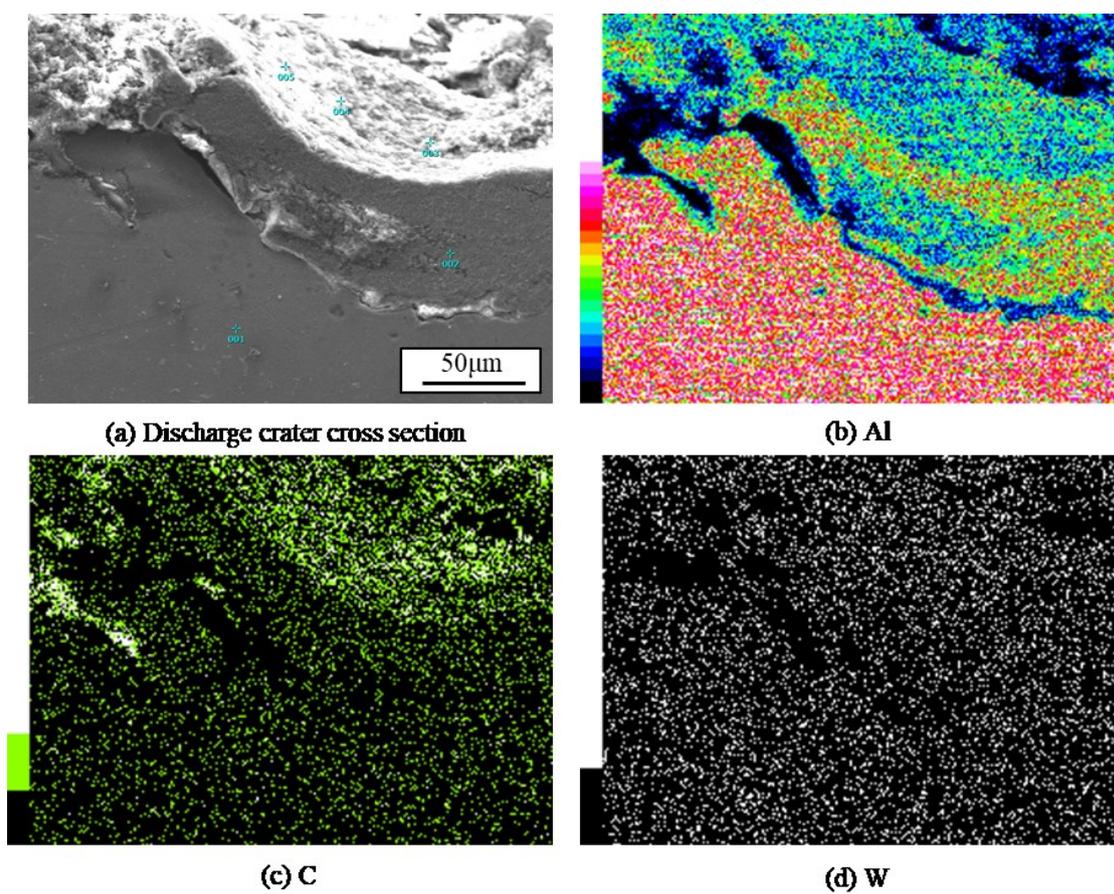


Fig.5.4 Element mapping of the discharge crater cross section

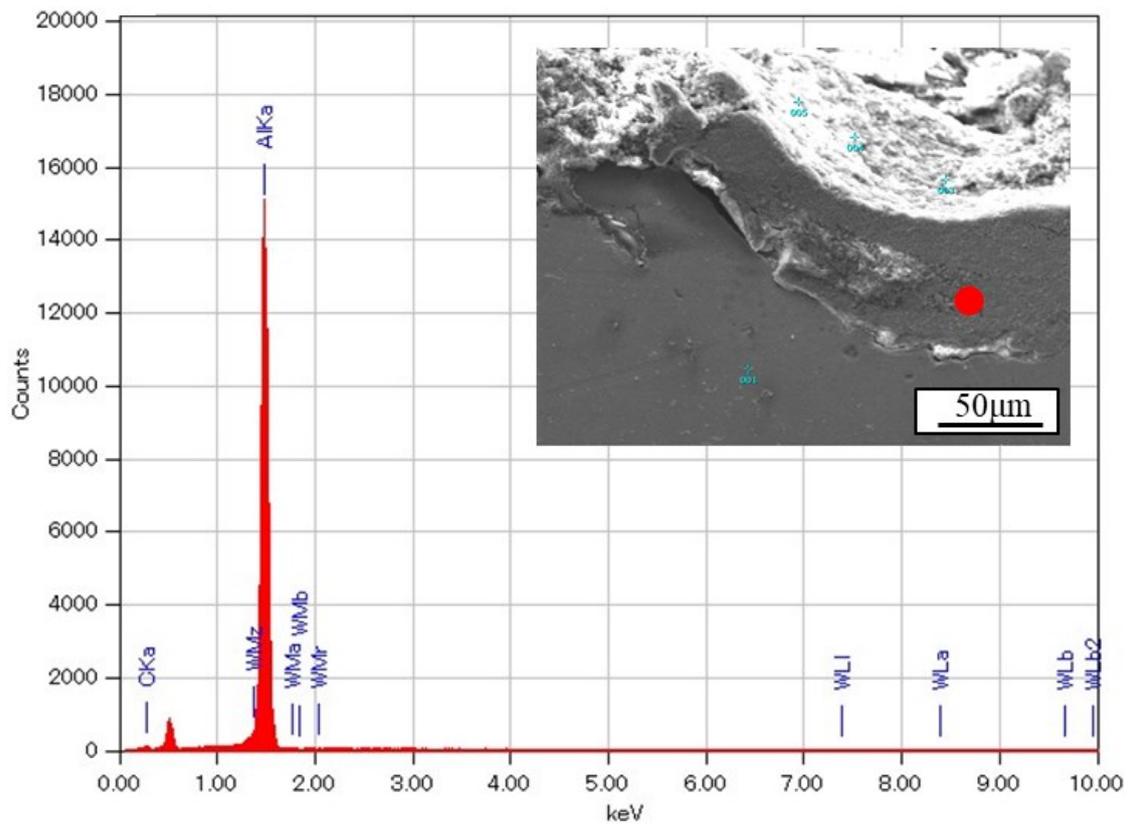


Fig.5.5 Spectrum analysis results of nickel discharge crater surface



### 5.1.2 極性を逆極性とした場合

加工液に油を用いて Al に逆極性という加工条件での観察を行った。

放電痕の SEM 画像，スペクトル分析した結果を図 5.8，図 5.9 に示す。図 5.8(c)かからわかるように放電痕表面には気孔のような小さな穴が多く確認された。表面は一様であり母材の Al であった。

タンゲステン加工電極の SEM 画像，元素マッピング，スペクトル分析結果を図 5.10，図 5.11，図 5.12 に示す。表面は被加工物である Al によって覆われていたが，正極性では確認できなかった炭素による層も形成されていた。

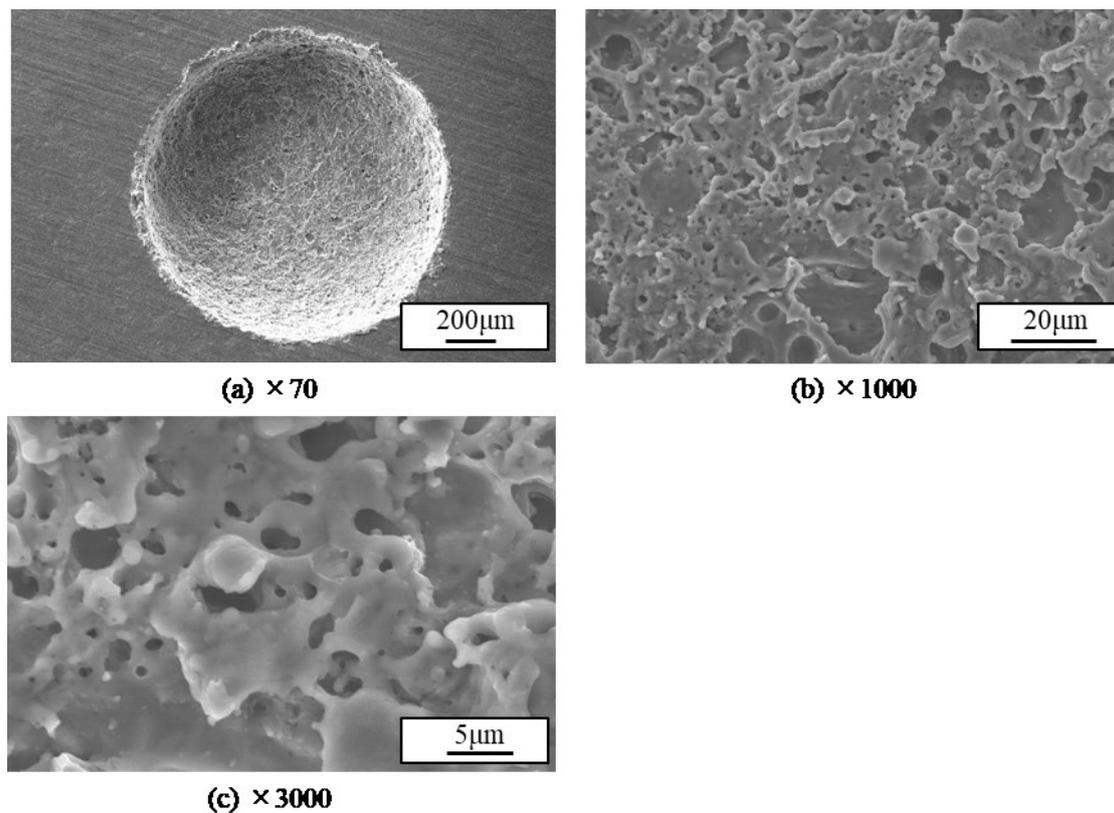


Fig.5.8 SEM image of the discharge crater surface at each magnification

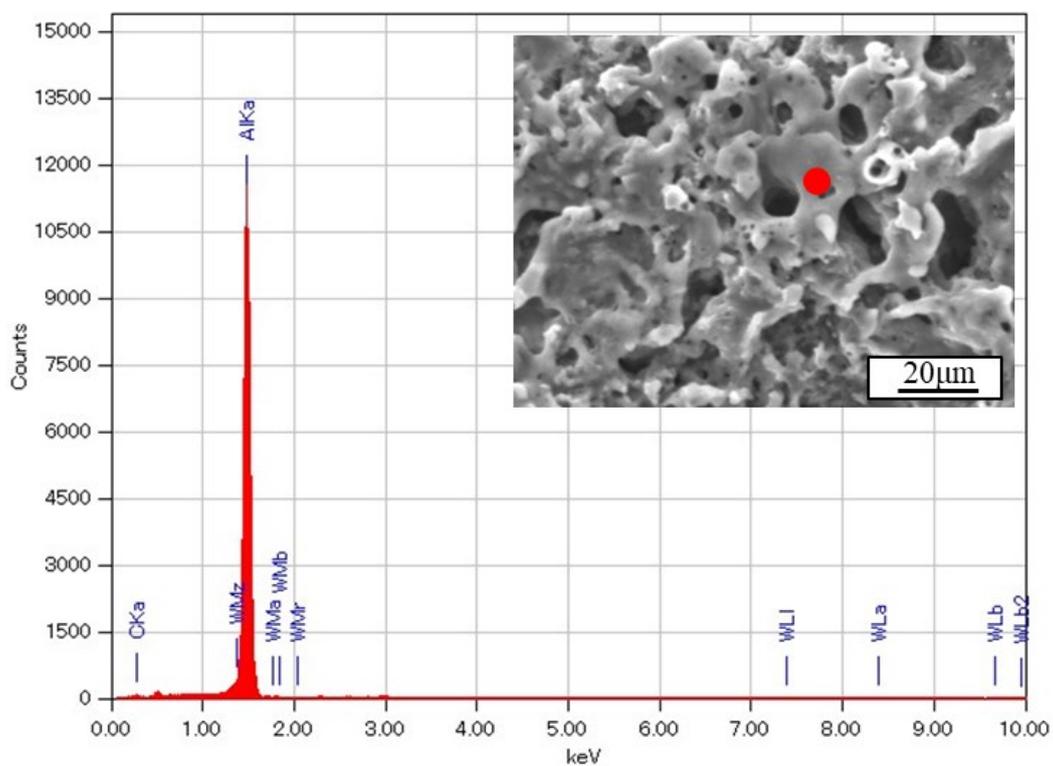


Fig.5.9 Spectrum analysis results of the discharge crater surface

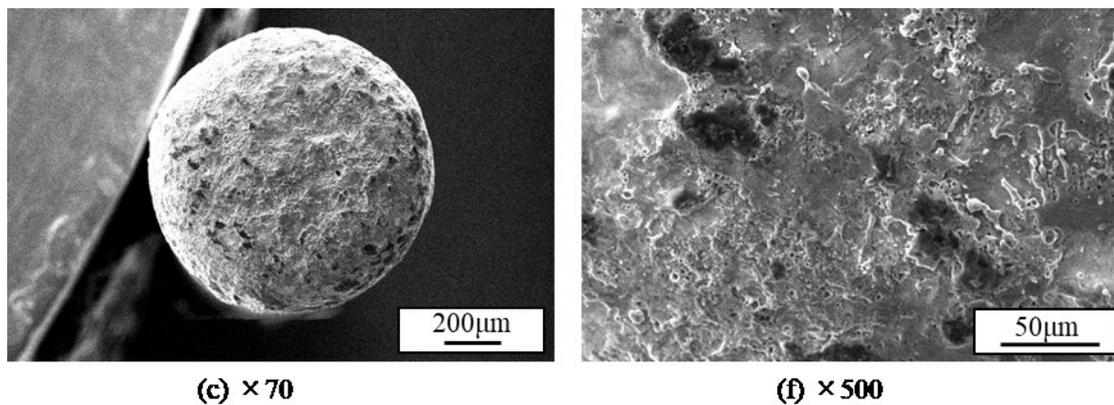


Fig.5.10 SEM images of the machining electrode surface at each magnification

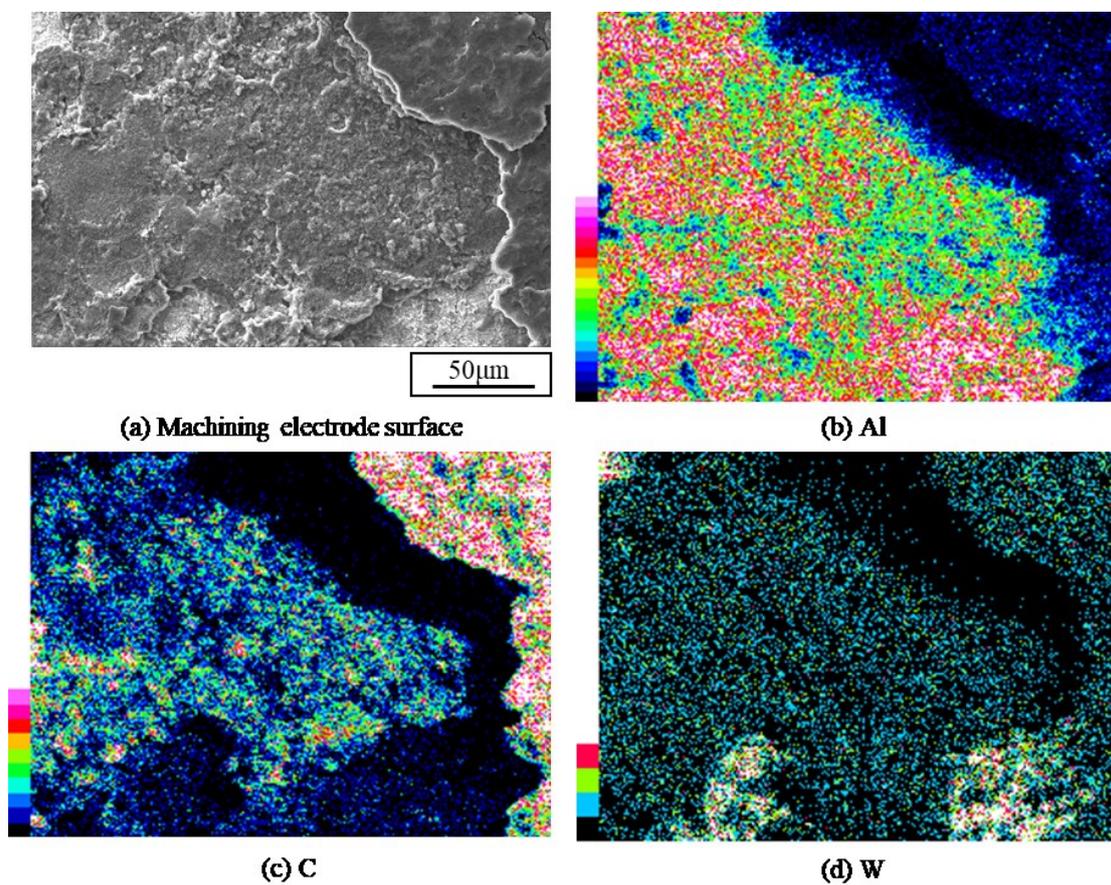
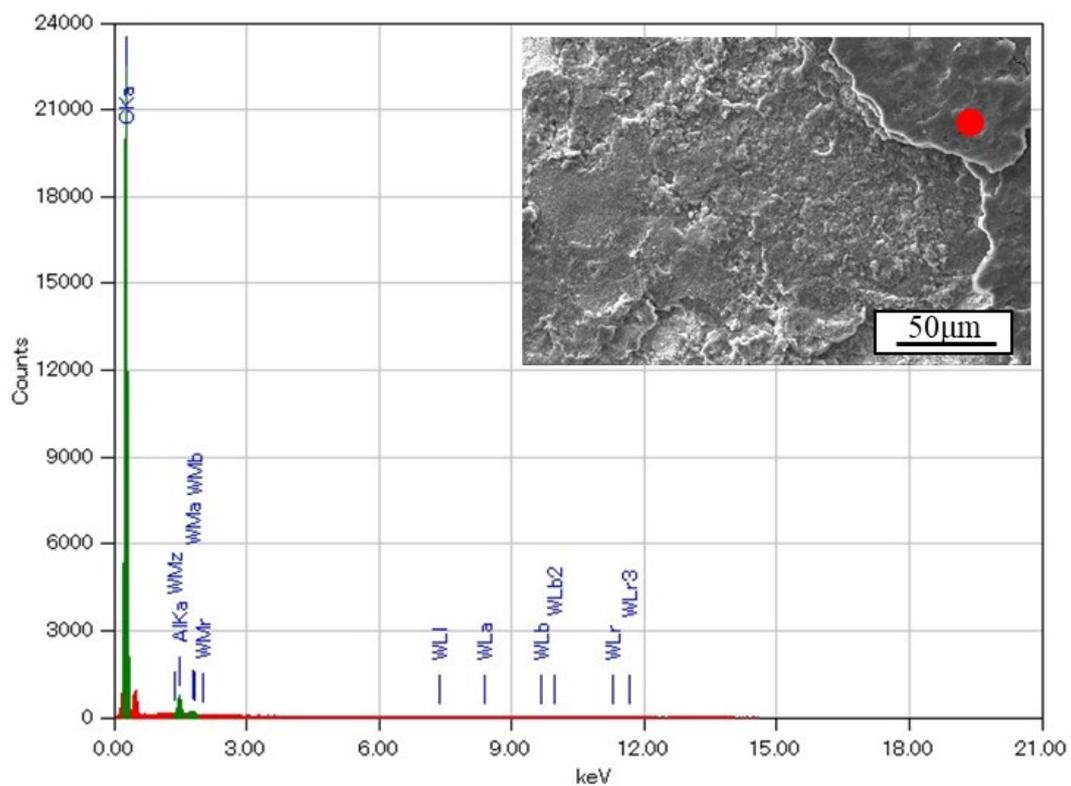
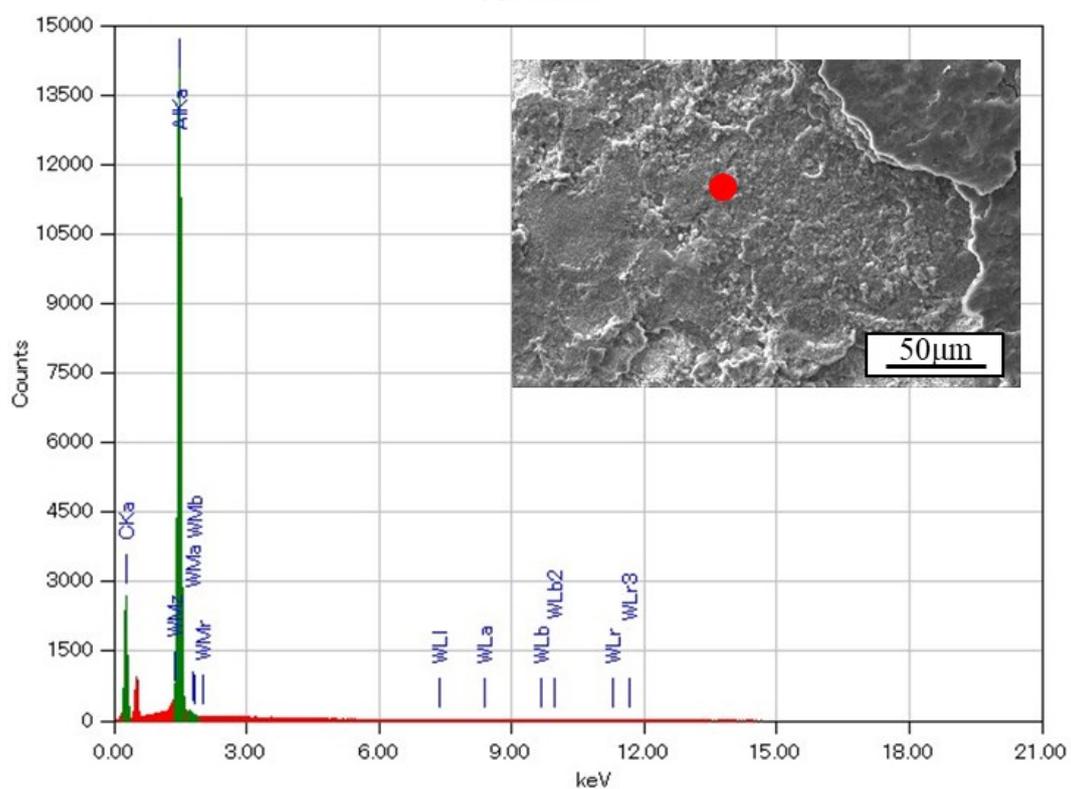


Fig.5.11 Element mapping of the machining electrode surface



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.5.12 Spectrum analysis results of the machining electrode surface

## 5.2 加工液に水を用いた加工

### 5.2.1 極性を正極性とした場合

加工液に水を用いて Al に正極性という加工条件での観察を行った。

放電痕の SEM 画像，スペクトル分析した結果を図 5.13，図 5.14 に示す。図 5.13(c) からわかるようにこちらにも放電痕表面には気孔のような小さな穴が多く確認された。表面は一様であり母材の Al であった。

タンゲステン加工電極の SEM 画像，元素マッピング，スペクトル分析結果を図 5.15，図 5.16，図 5.17 に示す。表面は被加工物である Al によって覆われていたが，一部タンゲステン電極の表面が出ていた。

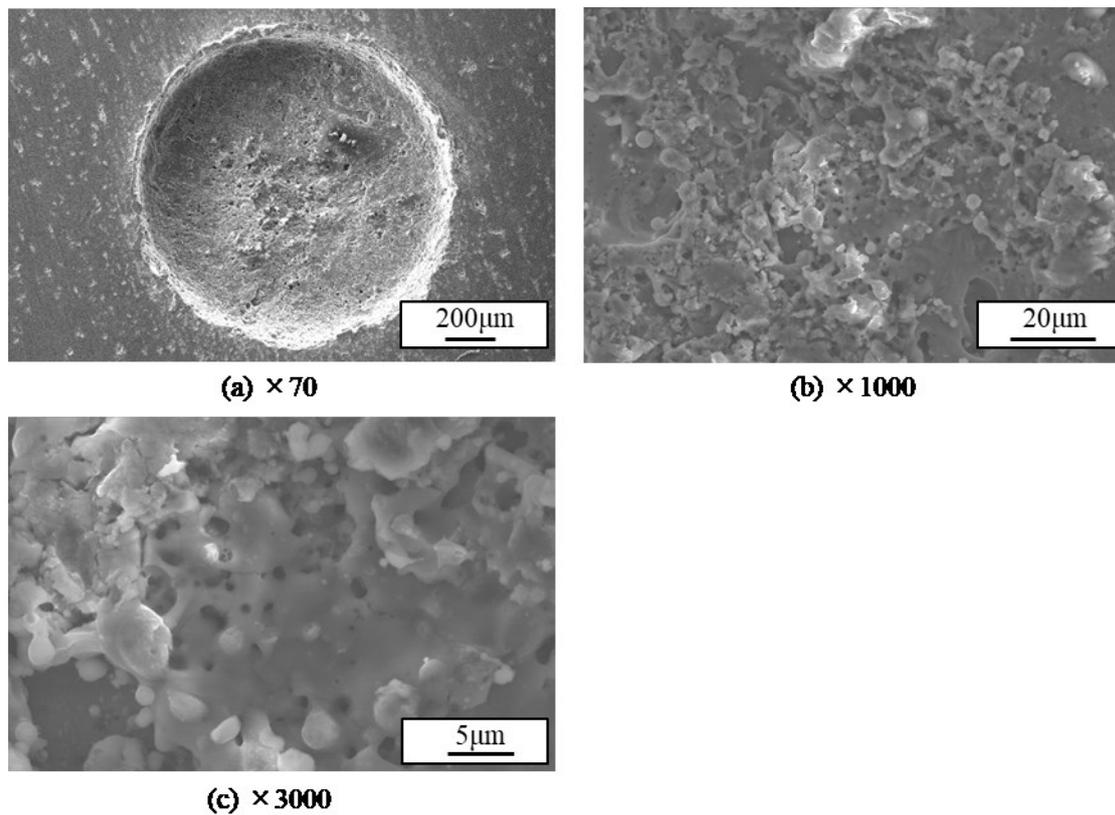


Fig.5.13 SEM image of the discharge crater surface at each magnification

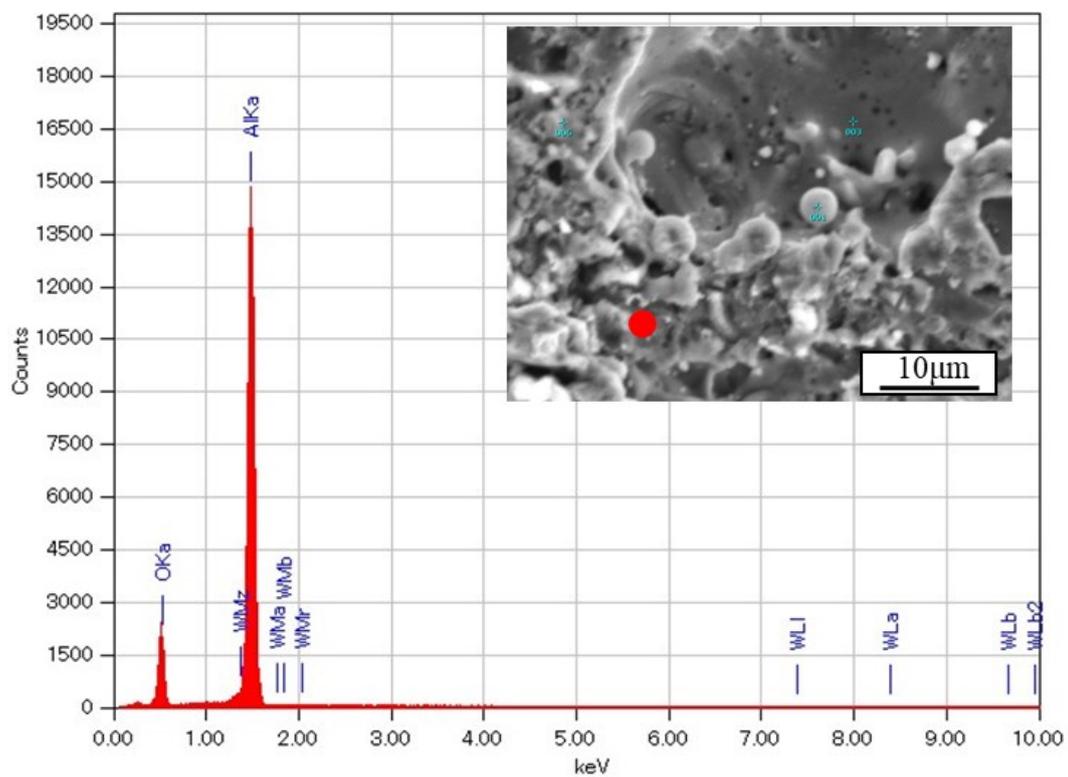


Fig.5.14 Spectrum analysis results of the discharge crater surface

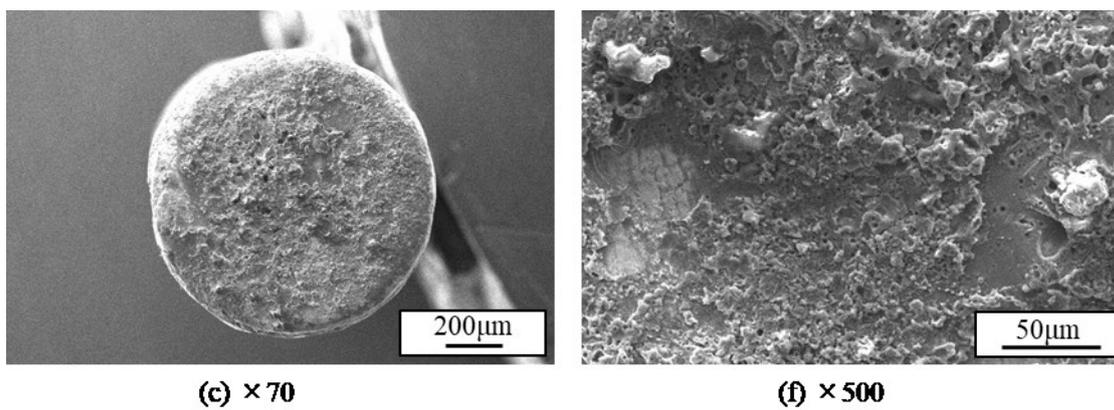


Fig.5.15 SEM images of the machining electrode surface at each magnification

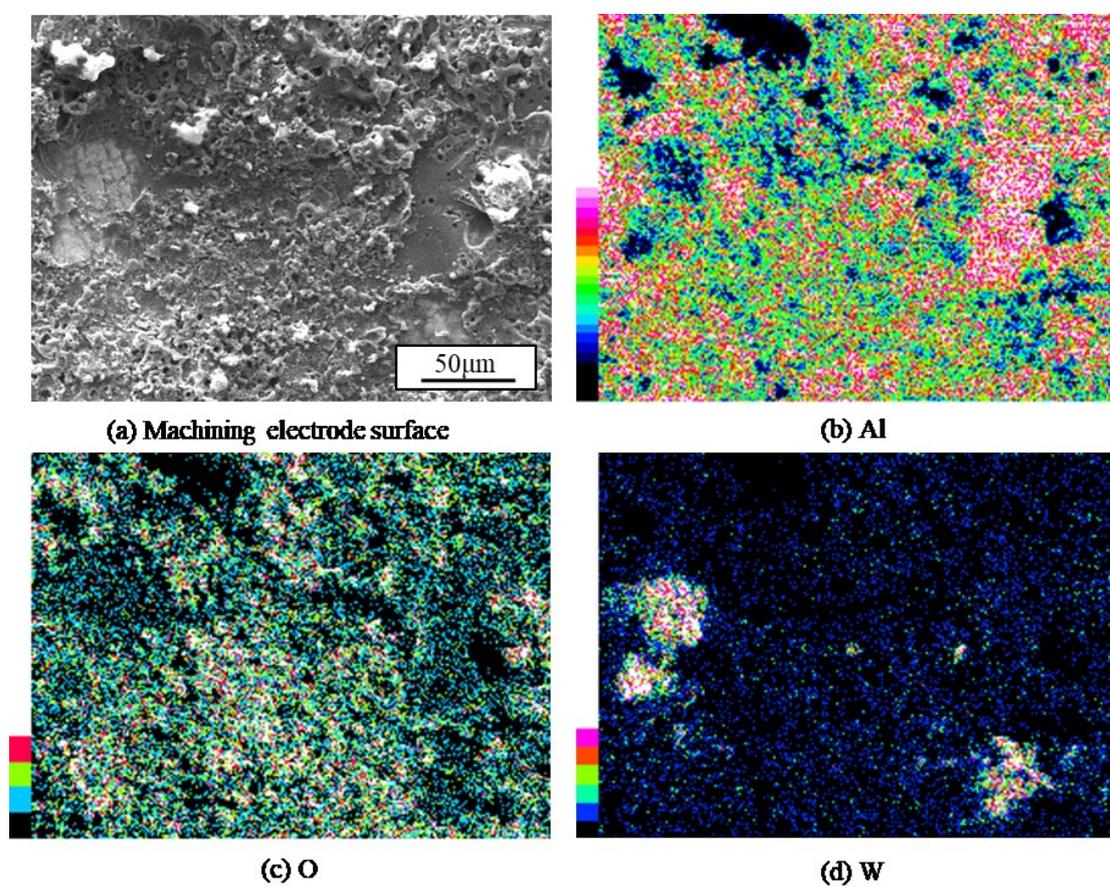
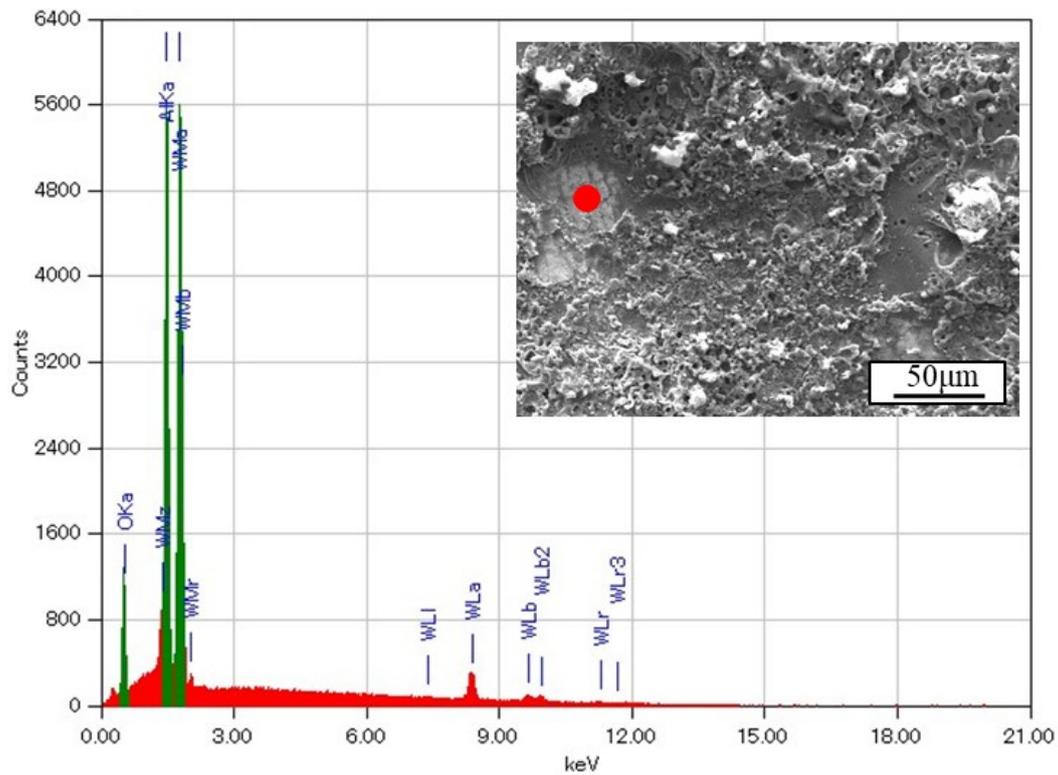
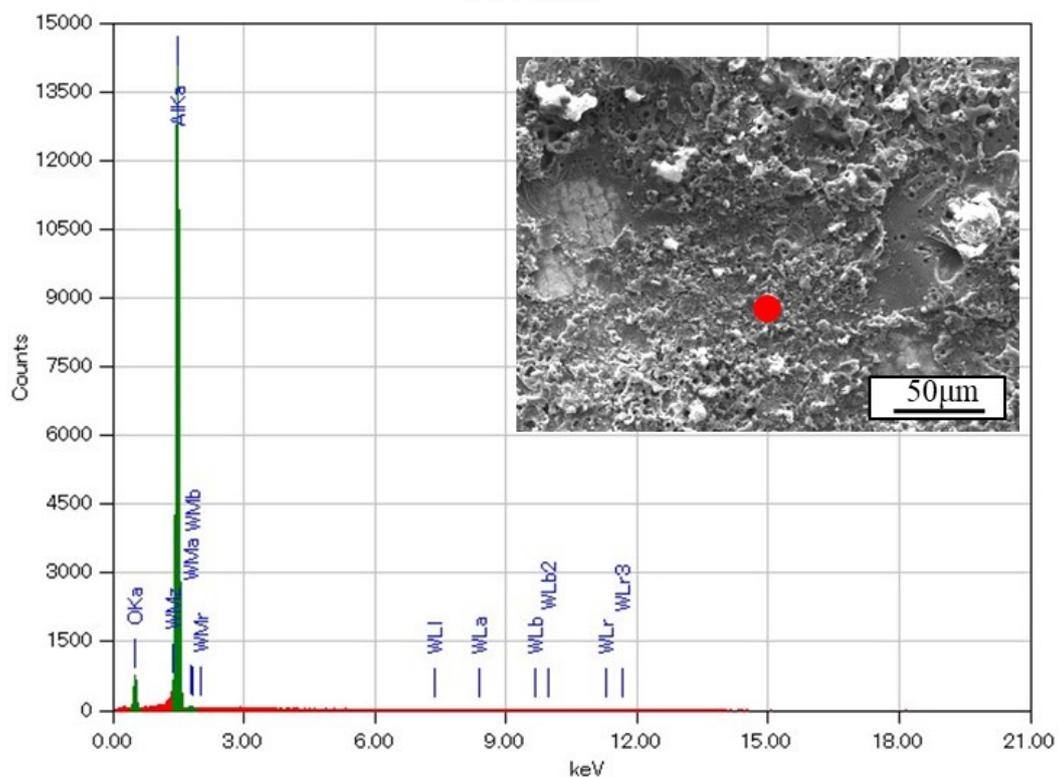


Fig.5.16 Element mapping of the machining electrode surface



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.5.17 Spectrum analysis results of the machining electrode surface

### 5.2.2 極性を逆極性とした場合

加工液に水を用いて Al に逆極性という加工条件での観察を行った。

放電痕の SEM 画像，スペクトル分析した結果を図 5.18，図 5.19 に示す。図 5.18(c) からわかるように放電痕表面にはこちらも気孔のような小さな穴が確認された。表面は一様であり母材の Al であった。

タンゲステン加工電極の SEM 画像，元素マッピング，スペクトル分析結果を図 5.20，図 5.21，図 5.22 に示す。表面は被加工物である Al によって覆われていたが，一部タンゲステン電極の表面が出ていた。

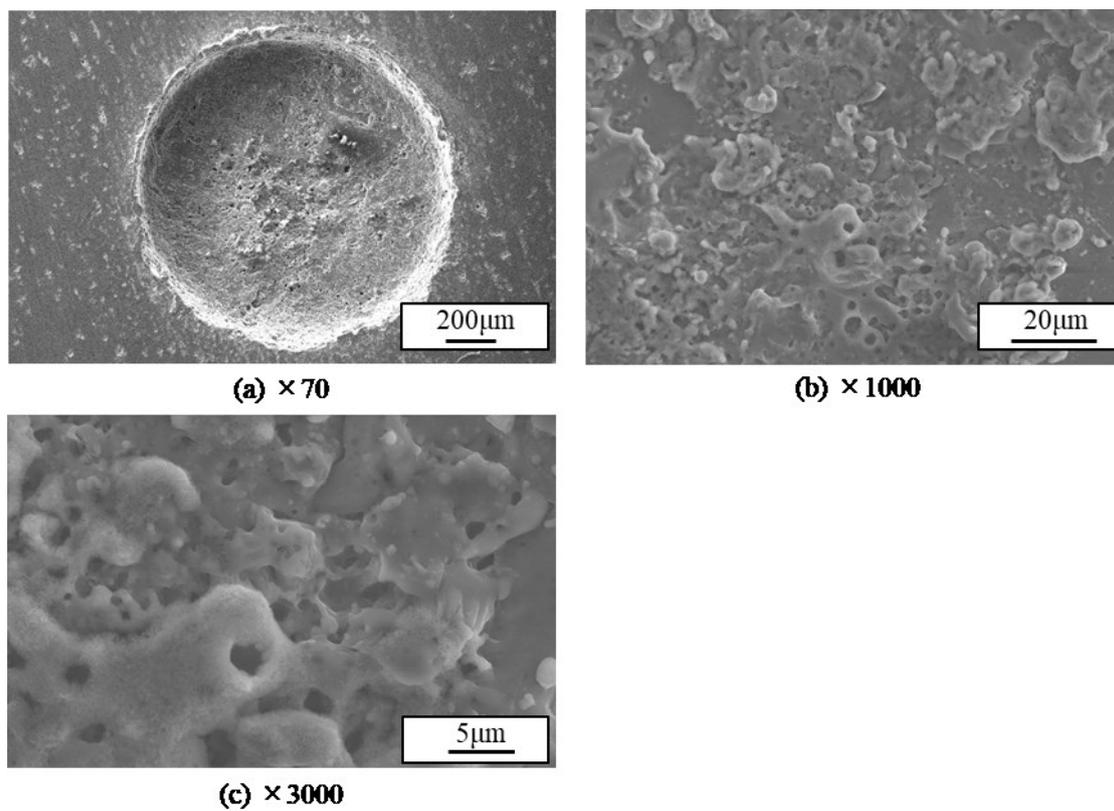


Fig.5.18 SEM image of the discharge crater surface at each magnification

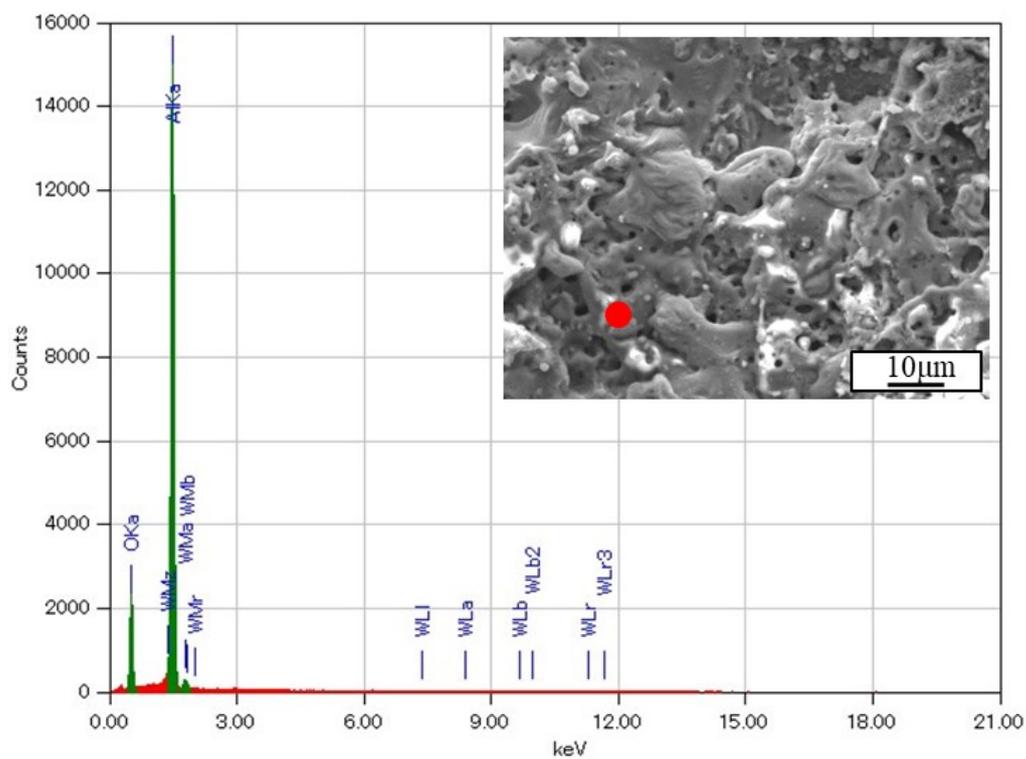


Fig.5.19 Spectrum analysis results of the discharge crater surface

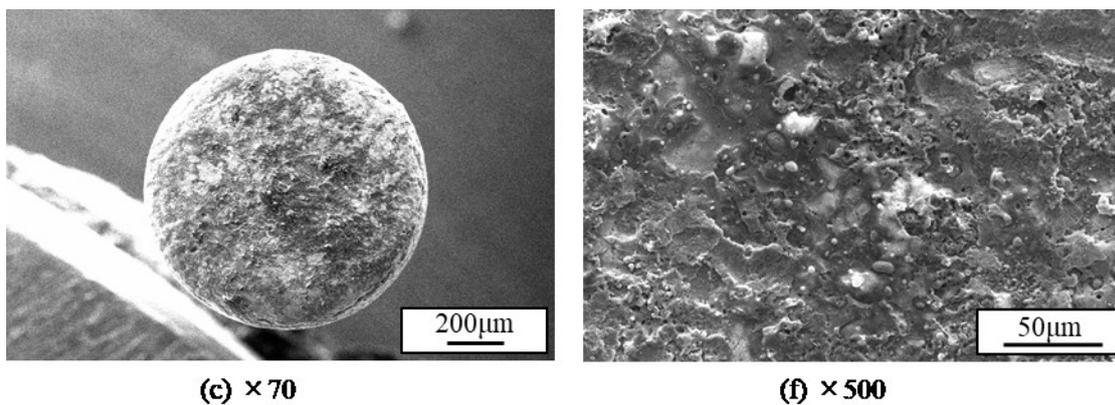


Fig.5.20 SEM images of the machining electrode surface at each magnification

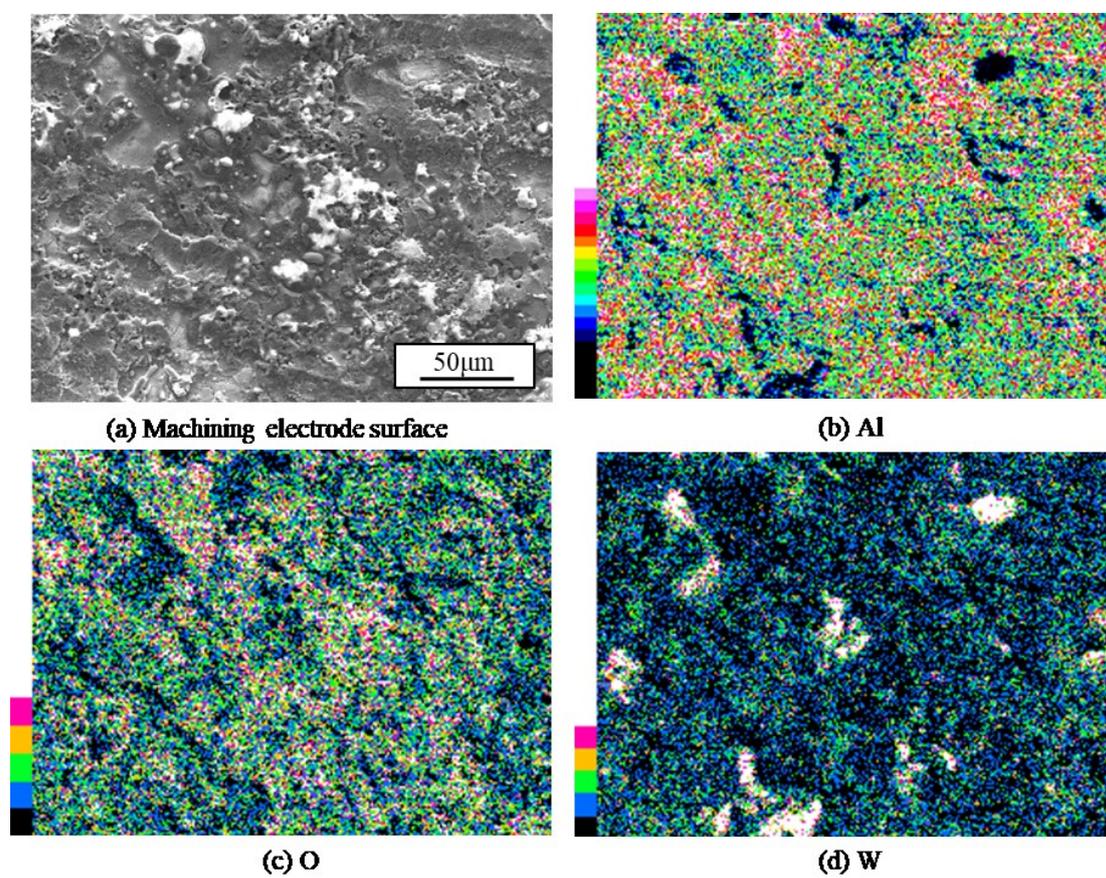
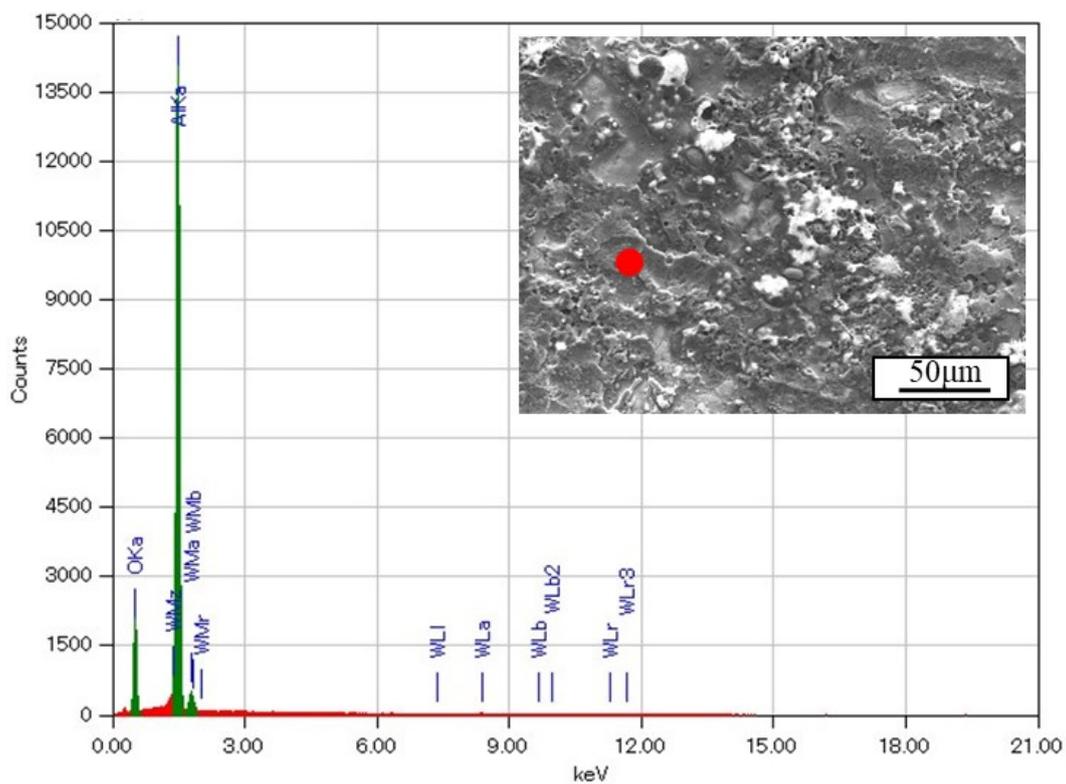
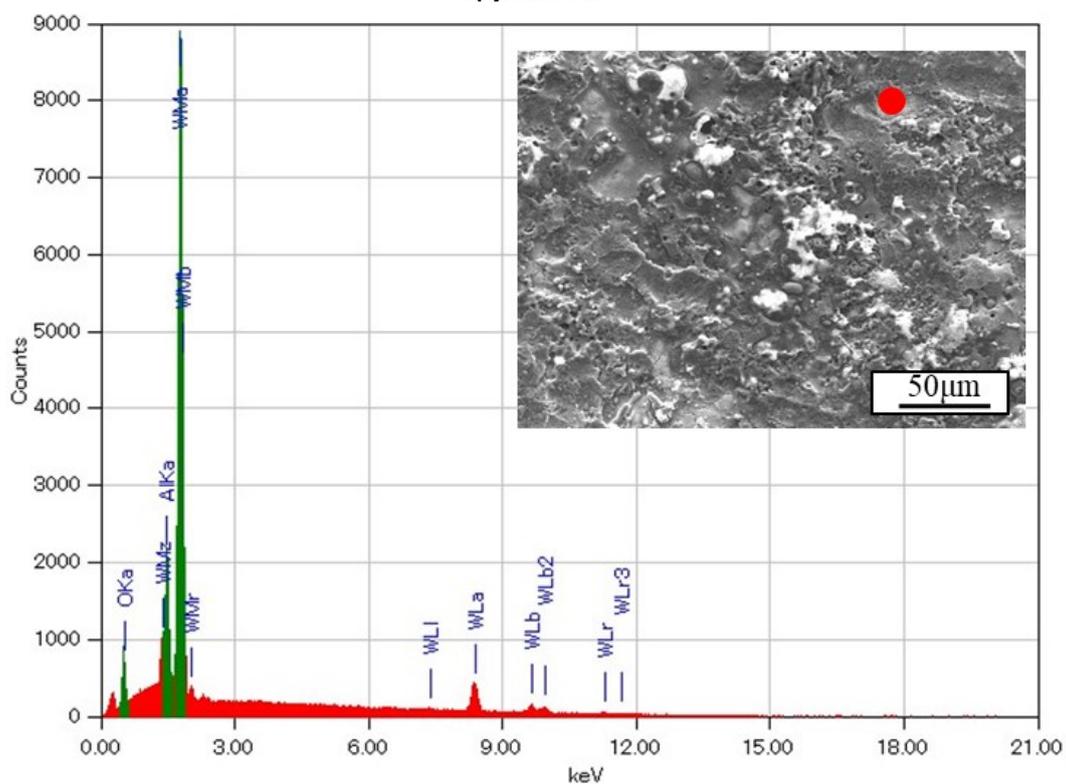


Fig.5.21 Element mapping of the machining electrode surface



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig.5.22 Spectrum analysis results of the machining electrode surface

### 5.3 考察

Al の加工での大きな特徴としては、放電痕、加工電極共に溶融再凝固したと思われる Al によって表面を覆われていることである。これは Al の融点が低いことが原因だと考えられる。ニッケルの融点が 1455 °C だったのに対し、アルミニウムの融点は 660.3 °C と非常に低い。そのため、同じエネルギーが加工面に加わっても溶融する量が異なる。その証拠として、Ni の溶融再凝固層が 20 μm 程度だったのに対して、Al は倍以上の 50 μm 程度である。

もう一つの特徴としては気孔のような小さな穴がほとんどの条件で確認された。これは溶融した Al がガスを巻き込み固まる際に、ガスが飛び出したことによるものだと考えられる。

Al においても加工液に油を用いた際に油の分解により生成される C が確認された。しかし、正極性の放電痕表面と逆極性の加工電極表面にしか見られなかった。この二つには共通点がある。それはどちらも陽極側に当たるということだ。このことから負極よりも陽極側に C が付着しやすいのではないかと考えられる。その理由として煤の帯電の可能性が考えられる。煤が帯電し、放電終了後大きな電解を持ち、陽極側に引き寄せられる。

水中での加工において、Ni の際に多く見られた W は一切見られなかった。これは被加工物である Al が溶融し、加工電極表面に付着したことによって Al 同士の加工になっていた可能性が考えられる。

やはりどの条件においても表面に Al が付着してしまっているため、Al において条件の比較によるメカニズムの推測は難しい。

## 6 結言

本研究では、放電痕形成メカニズムを明らかにすることを目的として放電痕、加工電極の表面層成分に着目し、加工液、加工物、加工極性による特性の比較を行った。実験結果から以下の結論を得た。

1. Ni に対し油を加工液として使用した場合、放電痕表面には溶融再凝固したと思われる Ni と、放電による熱分解により油から生成された C が確認された。C は小さな粒状で存在し、密集している。
2. Ni に対して油を加工液として使用した場合、熱分解によって油から C が生成され加工表面に付着する。その上から放電により溶融した Ni が覆いかぶさるが、濡れ性がないため分かれて存在する。その後、その近辺で放電が起こることで先ほどできた面の上に C が付着、そこに液体の Ni が覆いかぶさる。これを繰り返すことにより幾層にも重なった C を含む溶融再凝固層を生成すると推定される。
3. Ni に対して水を加工液として使用した場合、加工電極のタングステンが水中の酸素と反応し酸化タングステンとなる。これにより融点が下がり溶融し Ni と固溶体を作り放電痕表面に付着する。
4. 正極性に比べ逆極性とした場合、微細な加工が行われており、2  $\mu\text{m}$  程度の放電痕と思われるクレーターも確認できる。
5. 融点の低い材料に対する放電加工では条件の違いによる変化が放電痕表面に出にくい。
6. 油中の加工では煤が帯電することにより陽極側に C が付着しやすい。

## 文 献

- 1) 平晋一郎, 向山芳世, 佐野正明: 水性加工液中の放電除去現象について, 電気加工技術, 16, 53, pp.26-31, (1992).
- 2) 北村朋生, 国枝正典, 濱田重工株式会社 阿部耕三: 水と油加工液を用いた放電加工間隙の観察, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.231-232.
- 3) 元木幹雄, 小野雅章, 上出諭吉: 放電加工のギャップ現象, 電気加工学会誌, 8巻, 15号, pp.44-53, (1974).
- 4) 北村朋生, 国枝正典, 阿部耕三: 透明体電極を用いた水中と油中における放電加工現象の比較, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2013年度精密工学会秋季大会
- 5) 増沢隆久: やさしいマイクロ加工技術, 日刊工業新聞社, (2014)
- 6) 橋本浩明, 国枝正典: 分光分析による放電加工アークプラズマの温度変化の観察 電気加工学会誌, Vol.31, No.68, pp.33-40, (1997).
- 7) 国枝正典: 放電加工の基礎と将来展望 - I 基礎 -, 精密工学会誌, Vol.71, No.1, pp.58-62, (2005).
- 8) 辻田容希: 放電加工における放電痕形成メカニズムの解明, 筑波技術大学修士論文, (2017).
- 9) 野口暁, 大村悦二, 平田好則: レーザの多重反射と蒸発を考慮したレーザ穴あけ加工の熱流体解析 (第2報) —レーザの多重反射と材料の蒸発を考慮したレーザ穴あけシミュレーション—, レーザ加工学会誌, Vol.14, No.2, 2007, pp.113-119, (2007)
- 10) 花岡大生, 渡邊利行, 福澤康, 北村友彦: 形彫り放電加工特性に及ぼす放電加工油物性の影響 (第1報) —導電性材料の放電加工の場合—, 電気加工学会誌, Vol.47, No.115, pp.81-87, (2013).
- 11) 小川仁, 板東和宏, 常本佳生: 放電加工における加工液超音波振動援用の効果 (第1報), 電気加工学会誌, Vol.41, No.98, pp.163-168, (2007).
- 12) 吉田正弘, 国枝正典, 単発放電における加工屑の飛散の観察, 電気加工学会誌, Vol.30, No.64, pp.27-36, (1996).
- 13) 六碓賢亮, 放電加工面の異常組織, 金属表面技術, 16巻, 2号, pp.67-72, (1965).

## 謝 辞

本論文の作成にあたり，終始適切な助言を賜り，また丁寧に指導して下さいました 中西 栄徳 准教授に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり，終始懇切丁寧なる御指導を賜りました 高橋 裕 教授に深く感謝致します。また，本論文を御査読いただきました 川上 博士 准教授に御礼申し上げます。

さらに，実験を遂行するにあたり多くの御協力をいただきました 中川 浩希 技術職員ならびに集積加工システム研究室の皆様方に深く感謝致します。

最後に，幾多の御協力をいただきながら，ここに御氏名を掲載できなかった方々に対し，その失礼を御詫びすると共に，謹んで御礼申し上げます。