

論 文

マグネシウムのワイヤ放電加工特性

金子健正¹・山田隆一²

¹長岡技術科学大学大学院 (Nagaoka National College of Technology)

²機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

Wire Electrical Discharge Machining Property of Magnesium

KANEKO Kensei¹, YAMADA Ryuichi²

Abstract

Pure Magnesium was cut by Wire Electrical Discharge Machining, and its machining properties were compared with Aluminum base alloy. Moreover, the open voltage, the peak current, the average processing voltage and the off time were changed respectively to investigate the relationship between the machining condition and the machining accuracy of the cut section. Results showed that the cutting rate of Pure Magnesium could be twice as fast as that of Aluminum base alloy. However, straightness of Pure Magnesium was inferior to Aluminum base alloy. Additionally, the peak value of the discharge voltage and the discharge current affect the WEDM property of Magnesium.

Key words: WEDM, Pure Magnesium, Surface roughness, Straightness, Vickers Hardness

1. 緒 論

マグネシウム (Mg) は実用金属中最も軽く、比強度・比剛性に優れるため、主に構造材料として利用されている。しかし、Mgは非常に活性な金属であり、溶融した状態では酸化の傾向が強く、また粉末状のものは発火の危険性がある。そのため、Mgの主な製造方法であるダイカスト鋳造や切削加工などでは、作業場に防火対策を施したり、発火しないように加工屑の管理を徹底するなどの安全対策が必要である。また、加工においては、細かい切粉を発生させないように重切削を行ったり、工具と工作物との接触時に注意を払ったりする必要がある¹⁾。しかし、水中ワイヤ放電加工ではFig.1のようにリスクを負わずに加工を行うことができる。工作物は20°Cのイオン交換水で覆われ、発火の恐れはない。また、加工屑は20~30 μ m程度の酸化マグネシウムになっていると考えられるため、加工時や加工後の加工屑に特別な処理を必要とせず、安全に加工が行える。そのため、切削加工の場合と異なり、その処理に特別な注意を必要としない。だが、ワイヤ放電加工を用いてMg

を加工しようとしても、加工の前例が無いために適切に加工を行うことが困難である。実際に加工を行ってみると、ワイヤ断線の頻発、比抵抗の低下および加工表面の真直度の著しい悪化などが認められる。

本研究では、Mgのワイヤ放電加工特性を明らかにすることを目的として、Mgと他の金属を同条件で加工し、放電加工特性の違いについて考察した。また、加工条件の最適化のために、放電パルス幅や最大の電圧値・電流値を変化させ、その時の加工表面の真直度や表面粗さの測定や観察をすることで、電気条件が加工精度に及ぼす影響を調べた。



Fig.1 Machining scenery of Mg

2. 実験方法

実験には無電解電源を装備した市販のワイヤ放電加工機DIAX QA10を使用した。また、加工はすべてφ0.2mm黄銅ワイヤを用いた。工作物には板厚10, 30, 50mmの純マグネシウム(4N, 以下Mgと記述)と、比較用として5052アルミニウム合金を用い、Fig. 2に示すような矩形形状とした。一般的に、ワイヤ放電加工では角のある形状を加工すると放電状態が不安定になりワイヤ断線が起りやすい²⁾。そこで、本研究では矩形形状を断線せず加工できれば、加工可能と判断した。加工条件はTable1に示した加工機メーカー推奨のアルミニウム加工用の条件を使用し、最適送り制御で加工を行った。これは加工中の極間電圧が設定した平均加工電圧 U となるように送り速度を制御するものである。ファーストカット後は3次元算術平均粗さ Sa と工作物厚さ方向の真直度の測定および白色光顕微鏡を用いた表面観察を行い、加工特性を比較した。表面粗さは東京精密社製Surfcom1500DX、真直度はKeyence社製微小変位計AT3-400、レーザーテック社製白色光顕微鏡HD100を使用した。また、加工によって表面に形成された変質層の深さを調べるため、ビッカース硬さを測定した。試料厚さ方向の中央付近をダイヤモンドカッターで切断し、試料を樹脂ごめする。その後、切断面をバフ研磨機で研磨を行ってから、島津製作所製マイクロビッカース硬さ試験機HMV-1を使用して、加工表面深さ方向のビッカース硬さを10 μ m間隔で測定した。さらに、電気条件がMgの放電加工特性に及ぼす影響を調べるために、板厚10mmのMgを無負荷電圧、設定電流、平均加工電圧および休止時間を変えて加工し、加工速度、加工表面の3次元算術平均粗さ Sa および工作物厚さ方向の真直度を比較した。

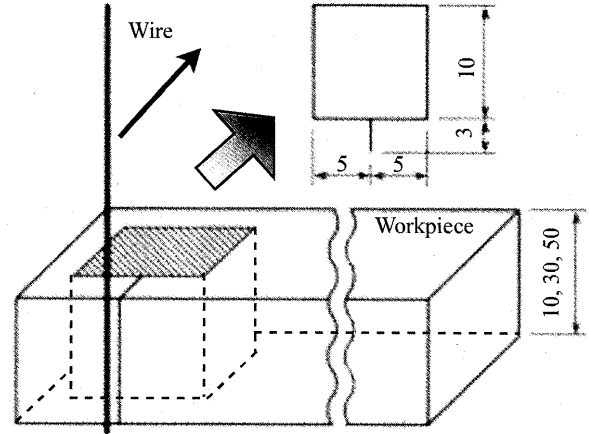


Fig.2 Machined shape

Table1 Machining conditions

Open circuit voltage: u [V]	150
Setting current: i_e [A]	250
Average working voltage: U [V]	49
Discharge duration: t_i [μ s]	1.6
Discharge interval time: t_o [μ s]	30
Wire tension [N]	12
Wire feed rate [m/min]	12

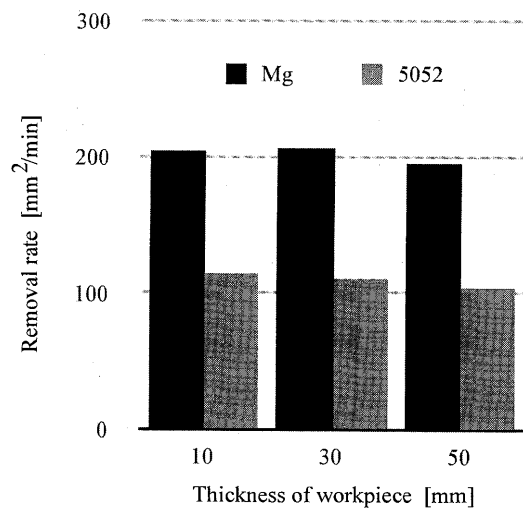


Fig.3 Thickness and removal rate

3. Mgと5052との比較

3.1 加工速度

各板厚におけるMgと5052の加工速度をFig.3に示す。Mgは5052の2倍の加工速度で加工が行われた。これはTable2に示したMgの熱伝導率の低さが影響したと考えられる。また板厚が厚くなっても、加工速度に変化はほとんど見られなかった。

Table2 Physical properties of material (1)

	Melting point [K]	Thermal conductivity [W/(m*K)]
Mg	923	156
Al	933	237

3.2 表面粗さ

Fig.4に示した3次元算術平均粗さSaの測定結果より、Mgはいずれの板厚においても表面粗さが5052よりも大きくなった。これは放電痕が5052よりも深いことを意味している。Fig.5とFig.6に示した板厚10mmのMgと5052の加工表面観察結果を見てみると、Mgの表面は直径の大きな放電痕が形成されているのが確認できる。これらのことから、Mgは1回の放電で除去される金属量が多く、加工速度を速くすることが出来るが、表面粗さが良好ではないといえる。加工表面だけでなく加工屑にも違いが現れた。Mgと5052の加工屑の観察写真をそれぞれFig.7とFig.8に示す。Mgの加工屑の直径は約20 μm であったのに対し、5052は約60 μm であった。これはTable3に示したMgの粘度と表面張力が5052よりも低く、半熔融状態でせん断されやすいことが原因と考えられる。以上のことから、Mgは1回の放電による金属の除去量が多く、かつ加工屑一つ一つの体積が小さいため、発生する加工屑の数が多いことが予想される。そのためMgの加工時には極間における加工屑濃度が高いといえる。

3.3 真直度

各板厚における工作物厚さ方向の真直度をそれぞれFig.9, Fig.10, Fig.11に示す。5052にくらべてMgは真直度が大きく劣っている。一般にワイヤ放電加工において真直度が良好でない理由としては、ワイヤの振動が加工表面に転写されるため、ゆるやかな弧を描いたような鼓形状になってしまうことが挙げられる。しかし、Mgの加工表面は端面部から急激に溝幅寸法が変化し、中央部においては一定になるという糸巻き形状を形成している。これはワイヤの振動以外に加工屑の滞留とマグネシウムイオン Mg^{2+} による比抵抗の低下が原因として考えられる³⁾。Mg加工時に発生する大量の加工屑が中央部に滞留することで、端部よりも放電が起りやすい状況になり糸巻き形状が形成されたと考えられる。また、高板厚の加工では工作物を切り開く面積が広くなるため、 Mg^{2+} の発生が顕著になる。この Mg^{2+} の発生がイオン交換樹脂のイオン交換能を上回るため、加工中に比抵抗が変化してしまう。板厚50mmでは、120k Ωcm だった比抵抗が、加工が終わる頃には70k Ωcm に低下した。この Mg^{2+} によって中央部の加工液だけが比抵抗が低

下し、極間が広くても容易に絶縁を破壊するため、端部と中央部で溝幅寸法が変化して真直度が悪化したと考えられる。さらに、Fig.12のように、板厚が厚くなるほど真直度が悪化する傾向が見られた。板厚が厚くなったことでワイヤ振動の振幅が大きくなることや加工屑の除去がより困難になること、切り開く面積が増えることでより多くの Mg^{2+} が発生し、加工液比抵抗が下がることの原因として考えられる。

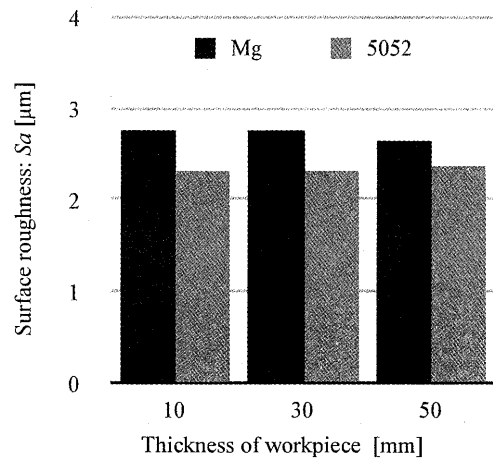


Fig.4 Thickness and surface roughness

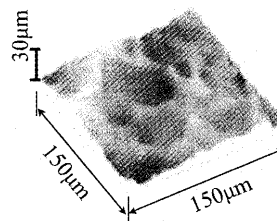


Fig.5 Surface of Mg

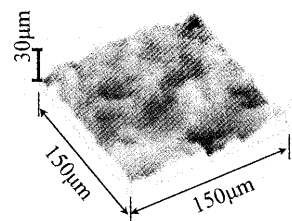


Fig.6 Surface of 5052

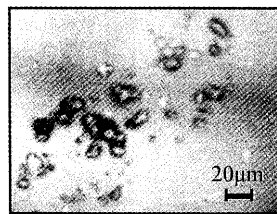


Fig.7 Debris of Mg

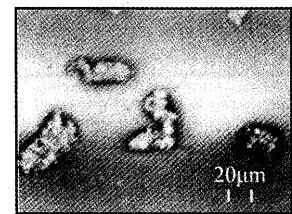


Fig.8 Debris of 5052

Table3 Physical properties of material (2)

	Viscosity [mPa*s]	Surface tension [N/m]
Mg	1.2	0.55
Al	4.5	0.92

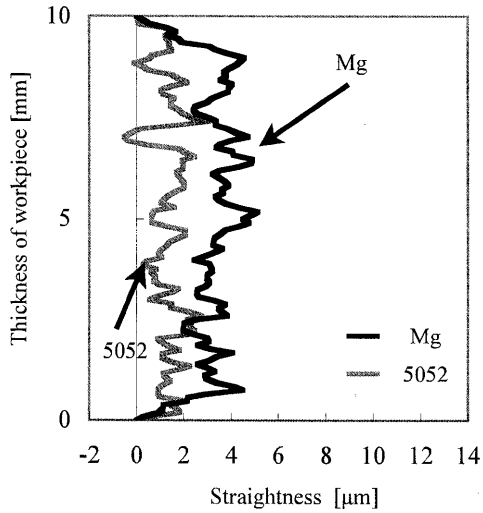


Fig.9 Straightness of 10mm thickness

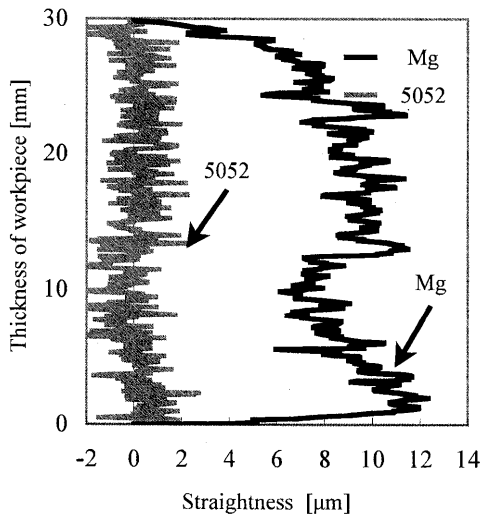


Fig.10 Straightness of 30mm thickness

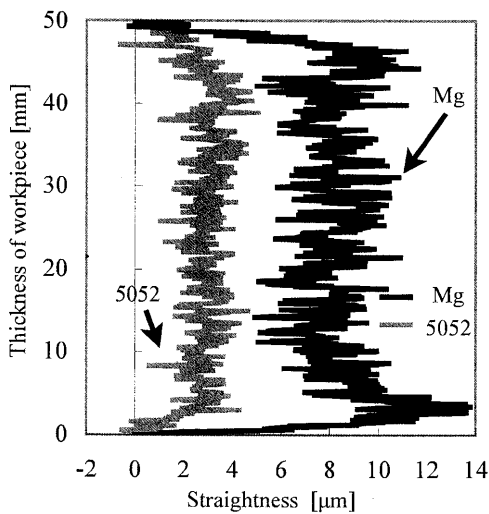


Fig.11 Straightness of 50mm thickness

3.4 ビッカース硬さ

加工表面深さ方向のビッカース硬さ測定結果をFig. 13に示す。一般に、ワイヤ放電加工の加工表面は5052の測定結果のように、電極材料である銅の固溶によって軟化する。しかし、Mgは加工表面に近いほど硬化する傾向が見られ、母材と比べて1.5倍ほどの硬さになっている。そこで酸素の定量分析を行ったところ、Mgの母材では1.6mass%だったが、加工表面では9.3mass%と、約6倍の酸素が検出された。この結果から、Mgはワイヤ放電加工を行うと加工表面に母材よりも硬い酸化マグネシウムの変質層を形成すると思われる。また測定結果より、加工変質層は30 μ mまで及んでいると考えられる。

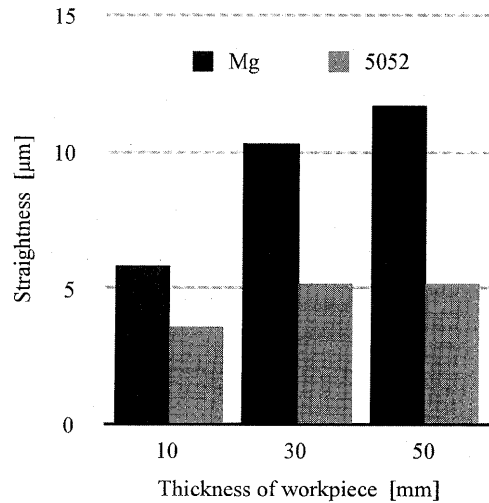


Fig.12 Thickness and straightness

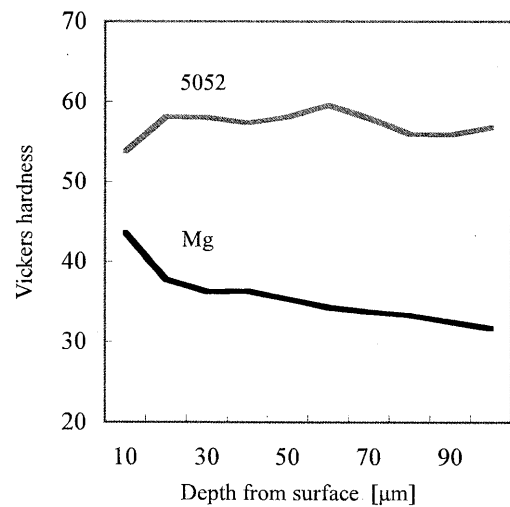


Fig.13 Depth from surface and vickers hardness

4. 電気条件がMgの加工特性に及ぼす影響

4.1 無負荷電圧を変化させた場合

無負荷電圧を変えた場合の加工速度と真直度および3次元算術平均粗さSaの測定結果をFig.14に示す。無負荷電圧を高くすることで加工速度が速くなる傾向が見られた。一方、真直度は良好になった。無負荷電圧が低い場合は極間の絶縁を破壊するエネルギーが小さくなるため、極間距離が狭くなってしまふ。しかし、無負荷電圧が高ければ絶縁を容易に破壊することが出来るため、極間距離が広くなる。それによって加工屑排出が容易になることと同時に、ワイヤ振動の影響を受けなくなるため、真直度が良好になったと考えられる。一方、表面粗さに変化は見られなかった。これらのことから、無負荷電圧が放電エネルギーに及ぼす影響は少ないといえる。

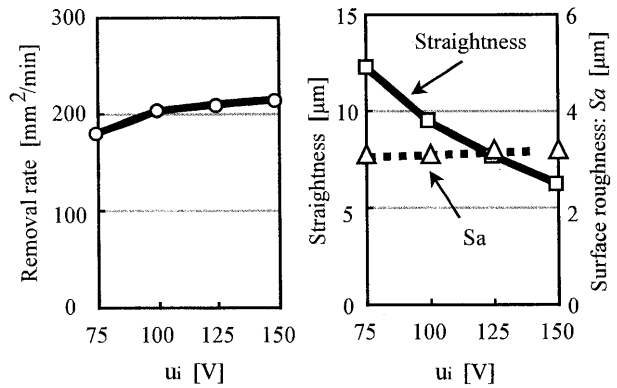


Fig.14 Open circuit voltage and cutting characteristics

4.2 設定電流を変化させた場合

設定電流を変えた場合の加工速度と真直度および表面粗さの測定結果をFig.15に示す。無負荷電圧を変えた場合と同様に、加工速度が速くなる傾向が見られた。これは設定電流を高くすることで放電エネルギーも大きくなるためである。しかし、それに伴い真直度と表面粗さは悪化した。これは放電エネルギーが大きくなることで、ワイヤが反発力を受け、ワイヤ振動の振幅が大きくなったことが原因と考えられる。また、各設定電流値における加工表面の鳥瞰図をFig.16に示す。加工表面の様子から、放電痕の直径も大きくなる傾向が見られる。また、設定電流をさらに上げたところ、400Aでワイヤが断線した。放電時のエネルギーが大きくなり、ワイヤ電極の消耗が激しくなったことが影響していると考えられる。

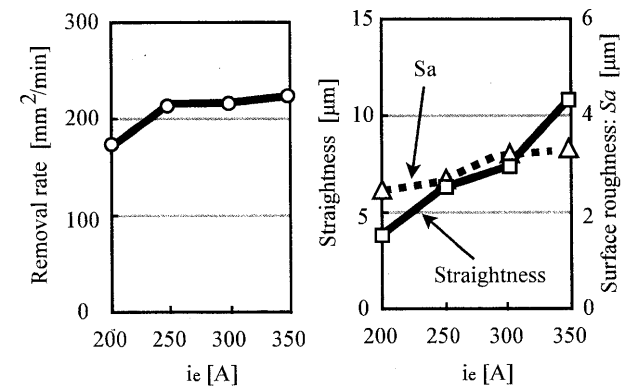


Fig.15 Setting current and cutting characteristics

4.3 平均加工電圧を変化させた場合

平均加工電圧を変えた場合の加工速度と真直度および表面粗さの測定結果をFig.17に示す。平均加工電圧を上げることで加工速度が大きく下がった。これは無負荷電圧印加時間を長くして平均加工電圧が大きくなるように自動制御するため、結果として単位時間あたりの放電回数が少なくなるのが原因である。しかし、平均加工電圧を30Vとかなり低く設定した場合、設定電流を上げるよりも速く加工を行うことができ、かつワイヤの断線が発生することなく

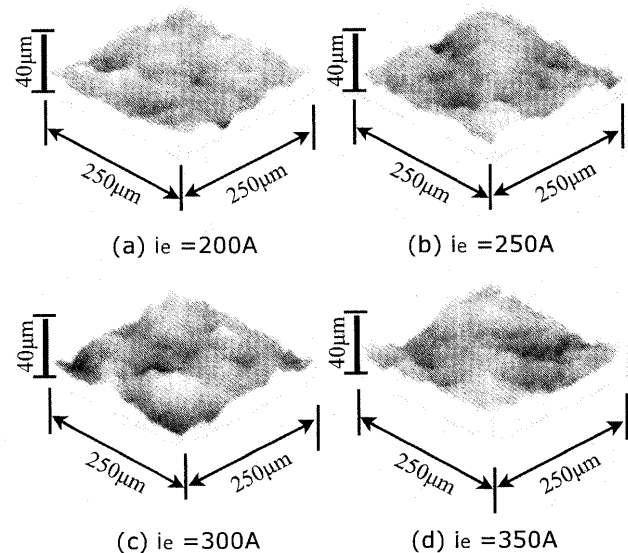


Fig.16 Setting current and processed surface

安定的に加工が行えた。通常、無負荷電圧印加時間を短くしてしまうと集中放電が発生し、真直度や表面粗さの悪化など、加工精度が良好でなくなる場合がある。しかし、Fig.18に示した放電波形より、平均加工電圧を下げて集中放電は発生せず、真直度が悪化する傾向は見られなかった。Mgの加工中は極間

の比抵抗が低くなり、極間距離が広がるので、無負荷電圧の印加時間が短くなってもある程度の極間が確保されている。そのため、集中放電が発生しにくくなっていると考えられる。また、表面粗さについても同様であった。平均加工電圧が加工表面に及ぼす影響はないといえる。

4.4 休止時間を変化させた場合

休止時間を変化させて加工した場合の加工速度と真直度をFig.19に示す。休止時間を長くすることで単位時間あたりの放電回数が少なくなるため、加工速度は低下した。また、平均加工電圧を変えた場合と同様に、休止時間が短くても真直度と表面粗さは変わることはなかった。平均加工電圧を変えた場合の測定結果も踏まえると、Mgのワイヤ放電加工では電圧波形と電流波形におけるパルス幅は加工特性に影響を与えることはないといえる。

5. 結論

- (1) Mgは5052の2倍の速度で加工を行うことができるが、真直度や表面粗さが良好ではない。これは放電時の除去量や発生する加工屑が関係していると考えられる。
- (2) ワイヤ放電加工後のMgの加工表面は表面に近いほど硬化する傾向が見られた。これは加工表面にMgよりも硬い酸化マグネシウムの層が形成されたことが原因と考えられる。
- (3) 無負荷電圧 u_i 、設定電流 i_e 、平均加工電圧 U および休止時間 t_o を変えて加工を行った結果より、Mgのワイヤ放電加工では、放電パルスにおける最大の電圧値・電流値が加工精度に影響している。一方、放電パルス幅は加工特性に影響を与えることはないといえる。

参考文献

- 1) 金属データブック, 日本金属学会編, 1974
- 2) 山内俊之ら: ワイヤ放電加工用高性能ワイヤ電極の開発に関する研究 (第1報) - コーティングワイヤの基礎的特性 -, 電気加工学会誌Vol.39/No.92 (2005.11), pp.29
- 3) 眞鍋明: ワイヤ放電加工, 日刊工業新聞社 (2008.1.18受付)

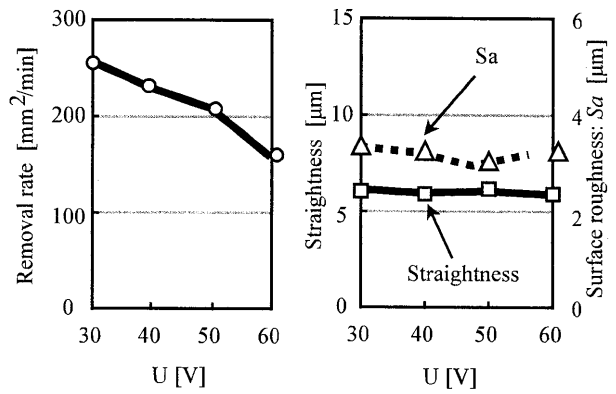
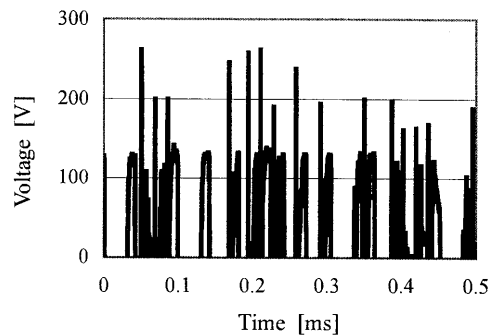
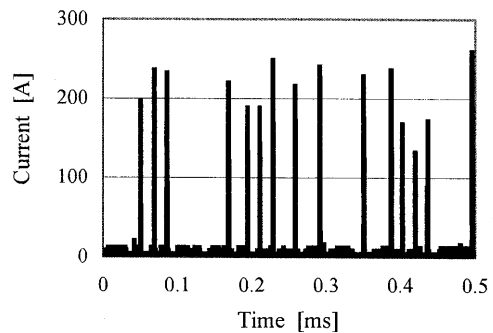


Fig.17 Average working voltage and cutting characteristics



(a) Voltage waveform



(b) Current waveform

Fig.18 Waveform at 30V average working voltage

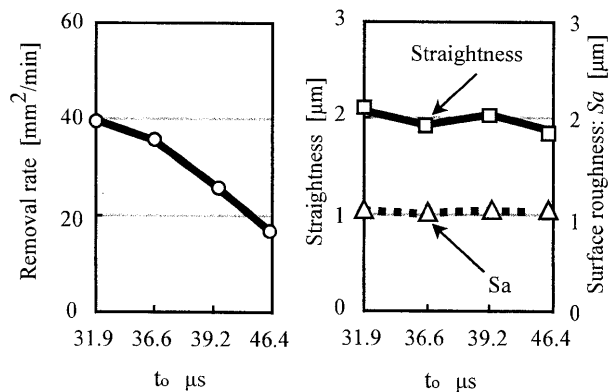


Fig.19 Pulse interval time and cutting characteristics