チタンおよびその合金の放電加工に関する研究 (その3)

チタンの放電切断性について*

財満 鎮雄** 平山 武*** 加藤 信吾****

Study on the electric discharge machining of titanium and its alloy (Part 3)

(UDC 669.295:621.9.018.5)

On the electric discharge machinability in cutting off of titanium*

ZAIMA Shigeo**, HIRAYAMA Takeshi***, KATO Shingo****

The electric discharge cutting machinabilities of titanium and its alloys are searched in comparison with the machinabilities of mild steel, brass, beryllium bronze, aluminium (2S) and others by the Lazarenko-circuit and the rotating electrode made of brass disk. In this paper, the electric discharge cutting machinability is discussed by the time required for cutting, that is, the necessary time to cut unit thickness and unit length in sec/mm-mm.

The results are summarized as follows:

- 1) There exists the most effective cutting condition relating to working current.
- 2) The electric discharge cutting machinability of titanium alloy is better than that of mild steel, and there are no differences in the machinability, however, Ti-8% Mn alloy has the best machinability and the machinability gets worse in the order of Ti-5% Al alloy, titanium and Ti-2% Al-2% Mn alloy.
- 3) On the cutting solution for titanium, machine oil shows the highest efficiency, followed by kerosene by light oil and then water in the rear.
- 4) The width of cutting slit is slightly larger than the thickness of electrode disk and is in the range of 1.4~1.6 times in titanium.
- 5) The roughness of the cutting surface is in $6\sim 10\mu$ and may be said the good surface.
- 6) The cutting efficiency increases in the raise with the source voltage and the source ampere, but there exists the most effective condition in the condenser capacity and, in this experiment, it is in about $200\mu F$.

(Received March 2, 1965)

1. 緒 言

周知のように放電切断法は機械切断、ガス切断などと加工原理が異なるため、実際の応用面でも利害得失がそれぞれ認められて一概に何れがよいと定めがたいが、材料の硬さ、靱性などに無関係に切断が行なえる点、切断のスリット巾が小さくてすむこと、切断局部の「かえり」がないこと、切断のための力による材料の変形がないことなどを考えると、チタンなどの素材切断、スリット切り、中空薄肉部品の切断などに適用してはなほだ有利であると考えられる。よつて前報までにチタンの放電孔あ

け加工特性について取扱つた^{1),2)} のにつづいて、ここにチタンの放電切断特性について検討を加えた。

2. 実 験 要 綱

2-1 使用回路

放電切断に用いる回路は断続アーク放電形式によるものが一般的であるが、本報では前報までに使用したものと同一の Lazarenko 回路 (RC 回路)³⁾ によつた。すなわち、加工電極棒と被加工物で回路を形成する代りに Fig. 1 のように、加工電極板 (運動円板) と被加工物との間に回路を形成する形式によつた。電源電圧 (DC) 20V、短絡

* 軽金属研究会第25回大会 (38—11—28) において講演したものの一部である。

** 静岡大学工学部機械工学科 教授 工博

Prof., Faculty of Engineering, Shizuoka University, Dr. Eng.

*** 静岡大学工学部機械工学科 助手 Assist., Faculty of Engineering, Shizuoka University.

**** 三菱油化(株)四日市工場 Yokkaichi Factory, Mitsubishi Petrochemical Co., Ltd.

Table 1 Titanium and its alloys.

Works	Chemical compositions (%)								Mechanical properties		
	Alloying elements		Impurities					Ti	Tensils strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Vickers hardness (kg/mm ²)
	Al	Mn	N	O	C	H	Fe				
Titanium	—	—	0.02	0.03	0.02	0.007	0.05	bal	50	30	203
Ti-5% Al alloy	5	3	0.01	0.06	0.01	0.005	—	bal	100	15	360
Ti-8% Mn alloy	—	8	0.01	0.06	0.02	0.005	—	bal	90	18	365
Ti-2% Al, 2% Mn alloy	2	2	0.01	0.06	0.01	0.005	—	bal	73	22	325

Fig. 1 Electric discharge machining circuit.

電流 8 A, 加工電流 1 ~ 6 A, コンデンサ容量 60 ~ 300 μ F の範囲で実験を行なった。

2-2 加工電極板

電極は運動電極として直径約 135mm の黄銅板 (肉厚 0.3mm) を周速約 3.0 ~ 10.0m/sec の範囲で回転を与えた。もちろん肉厚は薄いほど切断速度ははやいわけであるが、機械的強度の点から制限を受けて、挫屈を生じやすいので本報の場合でも加工条件によっては加工困難な場合もあった。

2-3 加工液

加工液としてはマシン油、クロシン、軽油、水などを使用し、加工液中で切断を行なったが、普通一般に使用されている水ガラス系のものではこの場合円板電極を使用したので加工部以外でも通電するためか、電気分解が盛んにみられ満足に切断加工ができなかった。

2-4 被加工材料

切断材料としてはチタン板 H 材 (ビツカース硬さ $H_v = 203$) の切断性を他材料の切断性と比較するため、軟鋼板 ($H_v = 119$), 黄銅板 ($H_v = 116$), ベリリウム銅板 ($H_v = 250$) および 2 S ($H_v = 43.7$)などを対象とした。また、チタン合金としては Ti-5% Al 合金板 ($H_v = 360$), Ti-8% Mn 合金板 ($H_v = 365$) および Ti-2% Al, 2% Mn 合金板 ($H_v = 325$) について切断を行なった。チタンおよびその合金の化学成分および 2 ~ 3 の機械的性質を **Table 1** に示す。

3. チタンの切断加工性

Fig. 2 Relation between the machining speed and the circumferential speed of disk.

放電切断性を表わすものとして板厚 1mm の板を 1mm 切断するに要する時間 (sec/mm-mm) をもってした。この場合切断巾は運動電極板を一定肉厚 (0.3mm) としたので、切断スリット巾は考えないことにした。ただし、厳密にみれば多少材料、条件によつて変化するようである。

電極板の回転速度が加工速度におよぼす影響は例えば周速度約 3.0 ~ 10.0m/sec の範囲、加工液マシン油の場合 **Fig. 2** のようになり、周速度が増加するにつれて加工速度は急激に減少し、4.7 ~ 9.5m/sec ではほぼ一定の切断速度が得られることがわかった。各材料で周速度 3.1m/sec の場合に比べ周速度 9.5m/sec では約 $1/5$ の加工速度ですむのが認められる。他の方法によつても切断容易なの

左上**Fig. 3** Relation between the machining speed and the machining ampere in the case of the solution: machine oil.

左下**Fig. 4** Relation between the machining speed and the machining ampere in the case of the solution: kerosene.

右上**Fig. 5** Relation between the machining speed and the machining ampere in the case of the solution: light oil.

で、2 Sが最も切断容易なのは大きな意味はないが、軟鋼に比べ硬さが2~2.5倍高いチタン、ベリリウム銅などが容易に短時間に切断できることがわかった。

電極板の周速を9.5m/sec, コンデンサ容量 $C=200\mu$ 一定とした場合, 加工液の効果を調べるための実験を行なった。マシン油を加工液として切断を行なった場合の加工電流と加工速度の関係は**Fig. 3**のようになり, クロシン, 軽油および水をそれぞれ加工液とした場合, 同様に**Fig. 4, Fig. 5**および**Fig. 6**のような関係が得られた。

これらの結果より共通したことは一般にある加工電流の場合に最小の加工速度, すなわち最も切断能率のよい条件があることで, 実験範囲では大体において約3.0Aの付近で切断能率のよい処があるようである。(このことは同一回路の放電孔あけの場合にもある加工電流で最大孔あ

Fig. 6 Relation between the machining speed and the machining ampere in the case of the solution: water.

Fig. 7 Influence of the machining solution on the cutting speed in the case of titanium.

Table 2 Comparison of electric discharge cutting machinability.

Works	Solution	Machining speed (sec/mm-mm) (Machining ampere: 3A, disk speed: 9.5m/sec)				Vickers hardness
		Machine oil	Light oil	Kerosene	Water	
Titanium		11.9	32.7	23.5	57.3	203
Mild steel		16.8	65.1	65.9	—	119
Brass		10.2	4.6	8.5	12.0	116
Cu-Be alloy		11.3	23.4	20.6	40.7	250
Aluminium (2S)		2.1	5.5	3.2	9.9	43.7

け速度をとつたことを考えれば、RC回路の特性であるかもしれない)。ただし加工条件によつては、例えば軽油の場合軟鋼やチタンはある加工電流になると電極板の挫屈その他で切断不能になること (Fig. 5) もあつた。加工液によつて多少のちがいはあるが、軟鋼が最も切断性が悪く 2 S が最もよく、その間にチタン、ベリリウム銅、黄銅と切断性の悪い順に並んでいる。しかし、マシ

ン油ではこれら切断性の差は少なく全体として切断能率は良好で、水の場合には 2 S および黄銅ではさほどでないが他の材料でははなはだしく能率の劣ることがうかがえる。このことは例えばチタンについて加工液の影響を求めた Fig. 7 においてよくその傾向を知ることができる。すなわち、マシン油が最も切断能率がよく、クロシン、軽油、水の順に悪くなることがわかる。

Fig. 8 Relation between the machining speed and the circumferential speed of disk in the case of the titanium and its alloys.

Table 3 Electric discharge cutting machinability of titanium and its alloys.

Works	Machining speed (sec/mm-mm)	Vickers hardness
	Machining ampere: 3A	
	Capacity: 200 μ F	
	Disk speed: 9.5 m/sec	
	Solution: Machine oil	
Titanium	11.9	203
Ti-5%Al alloy	10.0	360
Ti-8%Mn alloy	9.2	365
Ti-2%Al, 2% Mn alloy	13.4	325

よって、電極板の周速度 9.5m/sec, 加工電流 3 A の場合の加工速度 (sec/mm-mm) を以て各材料の放電切断性を表わすものとしてまとめれば **Table 2** のようになる。これからみれば材料によって最も切断能率のよい加工液があり、(例えば黄銅では軽油), チタンあるいはベリリウム銅のように機械加工の困難な材料では適当な加工液と加工条件を見出せば、非常に簡単に切断が可能となる。

4. チタン合金の放電切断

Fig. 9 Relation between the machining speed and the machining ampere in the case of the titanium and its alloys.

Table 4 Width of cutted slit (1).

Works	Machining speed (sec/mm-mm)	Width of slit (mm)	Ratio to thickness of disk plate
Titanium	11.9	0.49	1.6
Mild steel	16.8	0.61	2.0
Brass	10.2	0.68	2.3
Cu-Be alloy	11.3	0.58	1.9
Aluminium (2S)	2.1	0.55	1.8

チタン合金は Ti-Mn 系, Ti-Cr 系, Ti-Al 系など目下開発途上にあり, 引張強さ, 耐熱クリープ強さ, 硬さなどの上昇と比重の小さい特性を高度に利用することを進めているので, 二, 三のチタン合金について放電切断性を求めた。前項よりコンデンサ容量 $C=200\mu$ のとき, 加工液はマシン油, 加工電流としては 3 A が効果的であったので, その条件でチタン, Ti-5%Al 合金, Ti-8%Mn 合金および Ti-2%Al, 2%Mn 合金について加工電極の周速度を約 3.0 ~ 10.0 m/sec の範囲に変化した場合の加工速度 (sec/mm-mm) を求めれば **Fig. 8** のようになる。周速度が 3.1 m/sec より 4.7 m/sec となると加工速度が急激に減少するが, 4.7 ~ 9.5 m/sec ではその減少がわずかであるのは **Fig. 2** と同傾向であり, とくに 3.1 m/sec ではチタン

(a) Titanium
(b) Ti-8% Mn alloy

Photo. 1 Cutted edge.

Works	Surface roughness R_a (μ)				
	Mean value	0	5	10	15
Titanium	10.0			o o o	o
Ti-5% Al alloy	8.0			o o o	o o o
Ti-8% Mn alloy	7.0		o o o	o	
Ti-2% Al, 2% Mn alloy	6.0	o o o	o o o		

Fig. 10 Surface roughness in cutted surface.

Fig. 11 Change of hardness in cutted end.

とTi-2% Al, 2% Mn合金のグループに比べTi-5% Al合金, Ti-8% Mn合金のグループはほぼ1/2の加工速度であった。(ただし周速度が9.5m/sccとなると両グループの差は顕著ではない。)

また、同様に加工液：マシン油，200 μ F，周速9.5m/scc

Table 5 Width of cutted slit (2).

Works	Machining speed (sec/mm-mm)	Width of slit (mm)	Ratio to thickness of disk plate
Titanium	11.9	0.49	1.6
Ti-5% Al alloy	10.0	0.48	1.6
Ti-8% Mn alloy	9.2	0.42	1.4
Ti-2% Al, 2% Mn alloy	13.4	0.45	1.5

の場合、加工電流と加工速度の関係は**Fig. 9**のようになり、いずれの場合も3 A付近で最小の加工速度、すなわち、最大切断能率をあらわすことがわかった。その場合、これらの材料の間ではHv=203~365の範囲にあるが、むしろ最も硬いTi-8% Mn合金とTi-5% Al合金の方がこれらより硬さの低いチタンおよびTi-2% Al, 2% Mn合金より切断能率がよいことになり、このことは前項と同様にして最小加工速度を表わす条件における加工速度(sec/mm-mm)をもつて切断性を表わすとして求めた**Table 2**をみると明らかになる。

5. 切断部分の性質

前項の最適放電切断条件で切断した場合の切断部の1例を**Photo. 1**に示す。写真左側(a)はチタン板の場合、右側(b)はTi-8% Mn合金の例である。これらの写真でもわかるようにいずれの材料でも切断部が波形になっているが、これはガイドはつけてあるが回転電極円板が横方向に振動するためと、電極円板の側面でも放電が行なわれるためであると思われる。したがって、切断スリット巾は電極円板の肉厚よりはかなり大きい場合が多く、実験材料については**Table 4**および**Table 5**のようになった。(これらの値はいずれも5回の実験の平均値である。)これからみればチタンでは電極板の厚さの約1.6倍のスリットが得られるが、同一放電切断条件でも黄銅は約2.3倍軟鋼で約2.0倍のスリットとなり、硬さも低く切断能率も非常によかつた2 Sが約1.8倍とスリット巾は狭い方となる。そして、チタン合金ではいずれも大体近いスリット巾で1.4~1.6倍の間にある。このようにスリット

Fig. 12 Change of machining speed rising with the source voltage.

Fig. 14 Change of machining speed rising with the source ampere.

Fig. 13 Change of machining speed rising with the source ampere in the case of titanium and its alloys.

Fig. 15 Change of machining speed rising with the source ampere in the case of titanium and its alloys.

Fig. 16 Change of machining speed rising with the condensor capacity.

Fig. 17 Change of machining speed rising with the condensor capacity in the case of titanium and its alloys.

巾は切断速度、硬さなどとは直接関係はないようにみられた。

また、切断部表面の粗さを大越式表面粗さ試験機によって求めればチタン合金の例を **Fig. 10** に示すようになり、切断スリット巾の広いチタンと Ti-5% Al 合金は表面粗さ $H_0 = 8 \sim 10 \mu$ を示し、比較的にスリット巾の狭かった Ti-8% Mn 合金、Ti-2% Al, 2% Mn 合金では $H_0 = 6 \sim 7 \mu$ と粗さも良好であった。

切断部近傍における微少硬さ変化をチタン合金について求めれば **Fig. 11** が得られた。切断部の極く近傍では硬さが低下しているとみられる傾向も感ぜられるが顕著ではなく、この程度の変化ではほとんど硬さ変化はないとみてよいと思われる。

6. 放電切断条件の影響

電源電圧が切断速度におよぼす影響について求めるため、各試料でコンデンサ容量 $C = 200 \mu F$ 、電源電流 : 8.0 A、加工電流 : 3.0 A、電極円板の周速度 : 9.5 m/sec、加工液 : マシン油の条件で 16 ~ 20 V の範囲で電源電圧を変化すれば **Fig. 12** のようになる。電源電圧が 16 V のように低い間は試料によって切断速度にかなりの差が認められ、軟鋼、チタン、ベリリウム銅など切断能率が 2 S の

2.5 倍程度劣るが、電源電圧が高くなり 20 V になれば切断能率は急激に上昇し前者の場合の $1/6$ 程度になる。同様の条件でチタン合金について求めれば **Fig. 13** となり、傾向は **Fig. 12** の場合と同様で 16 V では Ti-5% Al 合金、Ti-8% Mn 合金などチタンに比べて切断能率が大部悪いが、20 V になると $1/6 \sim 1/3$ 程度で合金間の差も大変少なくなる。

また、 $C = 200 \mu F$ 、電源電圧 : 20 V、加工電流 : 3.0 A、電極円板 : 9.5 m/sec、加工液 : マシン油の条件で電源電流を 5 ~ 8 A と変化した場合の切断速度は **Fig. 14** のようになり、チタンは軟鋼と同様に電源電流が 5 A と低いところでもかなり大きな値を示すが電源電流の増加とともに急激に減少するが、ベリリウム銅、黄銅、2 S などは実験条件では電源電流が小さい場合も切断速度はかなり小さい値をとり、7 A で最小値をとった後電源電流の増加に応じて再び大きくなる。同一条件においてチタンおよびその合金について検討すれば **Fig. 15** のようになり、電源電流 5 A ではかなり大きい切断速度を示しとくに Ti-8% Mn 合金では大きい値であるが、電源電流の増加とともに直線的に減少して切断能率が向上し、8 A では各試料間の切断速度にはさほど差は認められない。

また、実験範囲では電源電圧 : 20 V、電源電流 : 8 A、

加工電流：3 A，電極円板：9.5m/sec，加工液：マシン油が切断能率がよいことがわかったので，それらの条件を一定として $C=60\sim 300\mu F$ の範囲でコンデンサ容量を変化して，切断速度におよぼす影響を求めて Fig. 16 を得た。図にみるように $C=200\mu F$ で切断能率が最良で 2 S，ベリリウム銅，黄銅，チタンの順に能率が劣り軟鋼が最もよくないが，それよりコンデンサ容量が大きくても小さくても切断能率が悪くなる。同様の条件でチタン合金について求めたものが Fig. 17 で，やはり $C=200\mu F$ で最良の切断能率が得られかつチタンおよびチタン合金を通じてさほど差は認められないが，コンデンサ容量がその前後では試料間にかなり切断時間の差をもつことがみられる。

7. 総 括

Lazarenko 回路 (RC 回路) と黄銅製回転円板を電極としてチタンおよびその合金の放電切断性を軟鋼，黄銅，ベリリウム銅，アルミニウム (2 S) などと比較しながら検討を加えた。放電切断性を表わすものとして板厚 1 mm の試料を長さ 1 mm 切断するに要する時間 (sec/mm-mm) をとつた。その結果実験範囲において，

1° 加工電流によって切断性最良の条件が存在し，その電流より大きい場合も小さい場合も切断性は劣つてくる。

2° 加工液によって多少の違いはあるが，切断性は軟鋼が最も悪くチタン，ベリリウム銅，黄銅の順によくなり，2 S が最もよかつた。硬さから考えるとチタンは軟

鋼の約 2 倍程度高いので，軟鋼より容易に切断出来ることは実用的であつた。また，チタンでは加工液はマシン油が最も適当しクロシン，軽油，水の順序に切断能率が劣つたが，例えば黄銅では軽油が最も適したように材料によってそれぞれ最適の加工液があるようである。

3° チタン合金についてみれば放電切断性にさほど差はないが Ti-8%Mn 合金が最も切断性がよく Ti-5%Al 合金，チタン，Ti-2%Al，2%Mn 合金の順に切断性が劣つた。

4° 切断部のスリット巾は電極円板の肉厚より多少大きく黄銅，軟鋼など電極板の厚さの 2.3~2.0 倍程度であるが，チタンおよびその合金では 1.4~1.6 倍の範囲にあつた。

5° 切断面の表面粗さはチタンおよびその合金では $6\sim 10\mu$ 程度であつた。

6° 放電切断の場合電源電圧および電流は大きい程切断能率は上昇するが，コンデンサ容量は最適の切断能率を示す範囲があり (この場合 $C=200F$)，その値より大きくてもまた小さくても切断能率は劣つてくる。

なお，試料の入手および分析には日本電信電話公社電気通信研究所西畑三樹男氏の御尽力に負う処が大きい。付記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 財満，平山：軽金属，14，63 (1964)，48.
- 2) 財満，平山，加茂：軽金属，14，66 (1964)，269.
- 3) B.R. & N.I. Lazarenko: American machinist, May 8, 1947.