

放電加工によるチタン材の表面改質

Surface Modification of Titanium Material Using Electrical Discharge Machining Process

塚原 秀和* 南 久** 増井 清徳**
Hidekazu Tsukahara Hisashi Minami Kiyonori Masui

曾根 匠***
Takumi Sone

(2005年6月1日 受理)

This paper elucidates a possibility for surface hardening of titanium materials by carburizing using electro discharge machining (EDM) processing. During EDM processing, carbon from dielectric oil is diffused to the machined surface and a titanium carbide (TiC) layer forms on the titanium surface. A TiC layer with a crackless surface is obtained with short pulse duration using a low peak-current range under negative electrode polarity. In this study, the obtained layer's thickness was 5 μm and its hardness value was 2200 HV. The surface withstood a wear test extremely well with no detectable wear scar; the test was characterized by a low coefficient of friction (ca. 0.4).

キーワード：チタン・チタン合金・放電加工・表面改質・TiC・耐摩耗性

1. はじめに

チタンは比強度が高く、耐食性に優れるなどの特性を有するため、航空機部品や化学プラント、海洋開発用の材料として、昨今ではレジャー用品などでも、その需要が急速に拡大している¹⁾。しかし、チタンは機構部品として用いるには、耐摩耗性や耐焼付性が問題とされる²⁾。それらの対策として各種合金化や表面改質が行われている。各種合金化では、組織中にTiCを分散させたTi-6Al-4V-10Cr-1.3C³⁾のような耐摩耗性合金が開発されており、表面改質では、窒化やPVDによるコーティング²⁾などが試みられている。

放電加工は絶縁油またはイオン交換水中において、

工具電極と工作物の間に火花放電を発生させ、工作物を溶解、除去する加工方法である。油中での放電加工では、電極間の放電により、加工油が熱分解され、炭素を生じる。さらに熱分解炭素は、熔融状態の加工面に侵入し、浸炭層が形成される。一般にこうした加工表面は金型等の使用に際しては表面欠陥の原因となり易く、“加工変質層”として懸念されているが、仕上げ放電加工の条件によっては、高い耐摩耗性、耐食性を有することから“表面改質層”として活用することができる。放電加工で表面改質を行うには、放電持続時間の短い正極性（電極が陰極、処理材が陽極）、低電流パルス条件が有効である。この条件では、工作物はほとんど加工されず、滑らかで、一様な改質層が生成される。この方法を利用して、最近、放電加工を利用した表面改質の研究が盛んに行われている^{4,5)}。母材がチタンの場合、炭素の侵入により、表面にTiC層の生成が予想され、その結果、耐摩耗性などの向上が期待

* 機械金属部 金属表面処理系

** 機械金属部 加工成形系

*** 機械金属部

できる。放電加工による表面改質手法の特徴としては、既存の加工機械が使用できること、形状加工と同時に表面改質が行え、前処理工程を必要としないこと、穴部分などの形状処理に対応することや、部分処理にマスクングを必要とせず、基材への熱影響がほとんどないことや、特別なガス、処理液を必要としないことなどが上げられる。そこで、本研究では形彫り放電加工によるチタン材の表面改質の可能性について検討を行った^{6,7)}。

2. 実験方法

通常金型の製作などで用いられる総形電極を用いた形彫り放電加工では、放電の分散化が図りにくく、表面にマイクロクラックが発生しやすい傾向が認められる。マイクロクラックは疲労強度や耐食性などの点で問題となる可能性があるため、その発生を抑制する必要がある。また、型彫り放電加工では処理面の形状は電極形状に依存し、改質を連続して行う場合、電極消耗を考慮しなければならない。

そこで、本研究では放電の分散化および処理の効率化を図るために、薄板の平板電極を用いて、電極を走査させる方法⁸⁾で処理を行った。図1は実験装置の概念図を示す。電極は黄銅の薄板を用い、電極のサーボは処理面に垂直なZ軸のみとし、処理面に対し、平行に走査させて、表面改質を行った。

表1に本実験で用いた加工条件を示す。試料には、純チタン（純度 99.9%）、Ti-6Al-4V 合金（以下 64Ti）、Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 合金（以下 333Ti）を用いた。処理条件に関しては、材料の熱伝導率や融点などの諸特性の違いから、それぞれ最適化した放電条件を用いた。

得られた改質層は、表面および断面の組織観察、硬さ測定、X線回折分析、EPMA分析、ラマン分光分析を行うとともに、改質効果を、往復しゅう動式摩擦試験機による摩擦係数の測定、ならびに摩耗痕の観察により評価した。なお、摩擦相手材としては、摩擦・摩耗試験に多く用いられる軸受鋼球（SUJ2、φ4.8）を用い、荷重 0.98N、摩擦速度 20mm/s、大気中、無潤滑下で試験を行った。

3. チタン放電処理層の観察

図2は各試料の放電処理面の SEM 写真を示す。処理面は放電痕の重なった梨地状を呈し、マイクロクラックがなく、良好な面が形成されている。

図3は各試料の断面組織を示す。ほぼ一様な厚さ約

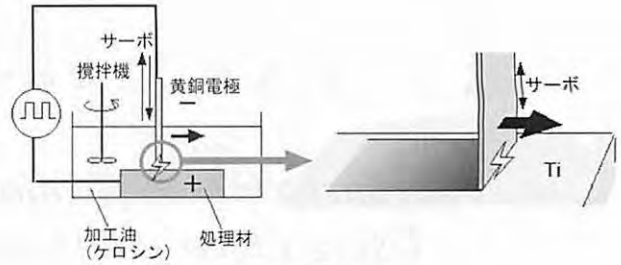


図1 装置の概念図

Outline of an experimental apparatus

表1 実験条件

Experimental conditions

放電加工機	Sodick A30R-NF25	
試料	Ti(99.9)	64Ti 333Ti
電極	黄銅	
電極厚さ	0.5mm	
電極幅	15mm	
加工液	白灯油	
開放電圧	120V	
電極極性	陰極	
放電電流	6A	3A
放電時間	2 μs	
放電休止時間	18 μs	30 μs
電極移動速度	83 μm/s	
走査回数	2回	4回

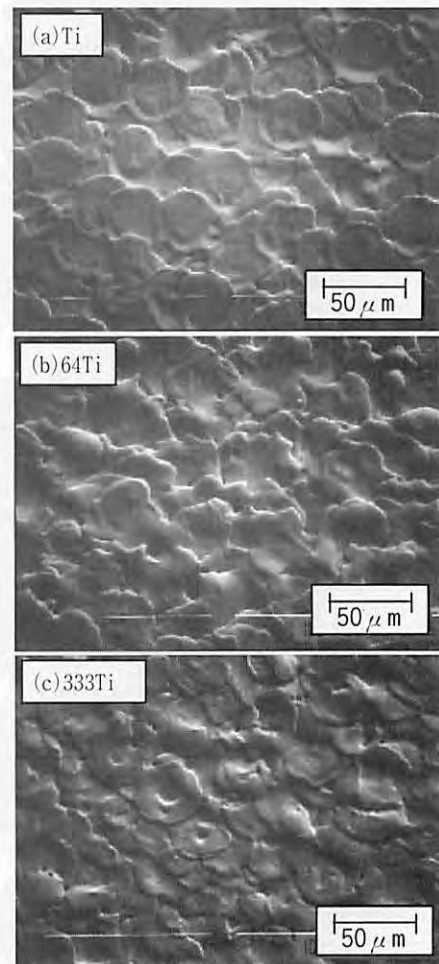


図2 放電改質面の SEM 像

SEM photographs of EDMed materials:

(a) Ti (b) 64Ti (c) 333Ti

5 μ m の改質層が形成されていることがわかる。また、熱影響層はほとんど見られなかった。表面あらさに関しては、純チタンの場合で Rz=3 μ m の面が得られた。

表2に改質層の硬さを、マイクロビッカース硬さ計を用い、荷重 0.49N で測定した結果を示す。測定は、改質層厚さは一様ではないが、層が厚くなる処理条件の試料を用い、断面から行った。各試料ともに、母材に対して著しく高い値を示している。ただし、合金に関しては、純 Ti より表面硬さが低くなっており、Ti 成分の減少が影響していることが一因と考えられる。

図4は各処理面の X 線回折の結果を示す。放電処理面には TiC のピークが強く検出され、生成が確認できた。ただし、合金に関しては炭素組成比の低い炭化物が形成されており、64Ti では TiC_{0.8}、333Ti では TiC_{0.5} 付近の炭化物が生成⁷⁾されている。これも硬さに影響しているものと考えられる。

図5は純チタンの場合の EPMA による放電処理面から内部に至る Ti, C の線分析結果を示す。表面から、C が Ti 母材内面に向かって、傾斜的に侵入していることが確認できる。64Ti、333Ti に関しても同様の結果が得られた。この結果から、放電加工による処理は、

表2 母材と改質層の硬さ

Hardness of EDMed surface

	Ti	64Ti	333Ti
母材	200HV	300HV	270HV
改質層	2200HV	1900HV	1600HV

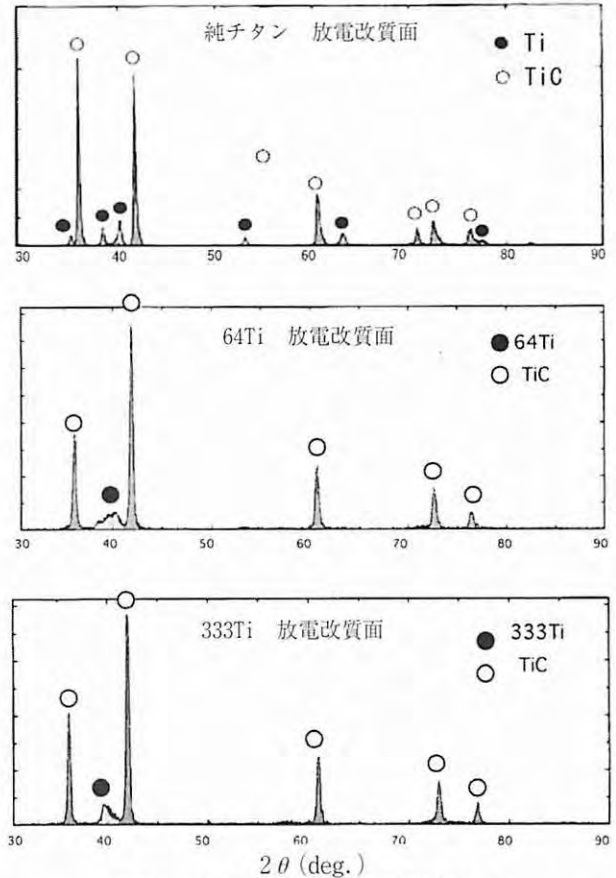


図4 放電改質面の X 線回折結果

X-ray diffraction profiles of EDMed surface

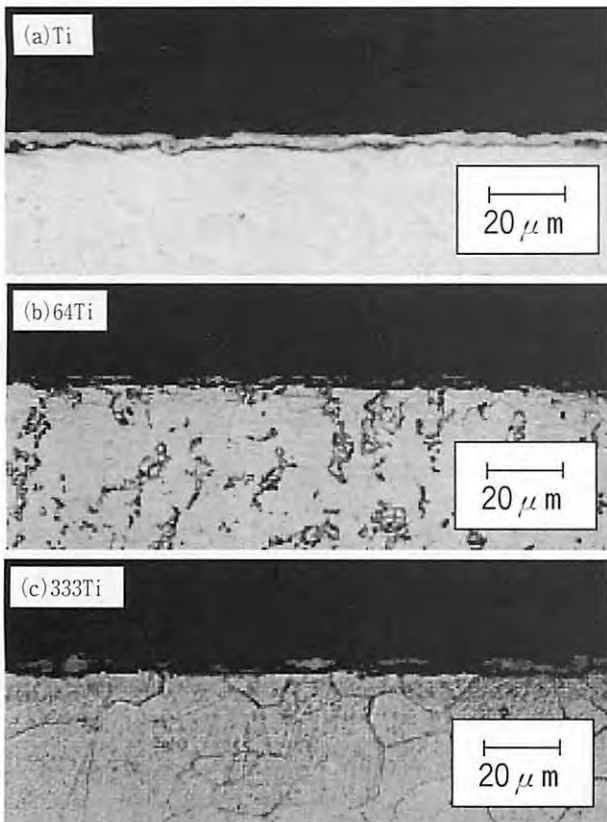


図3 改質面の断面組織

Cross-sectional microstructures of EDMed materials:

(a) Ti (b) 64Ti (c) 333Ti

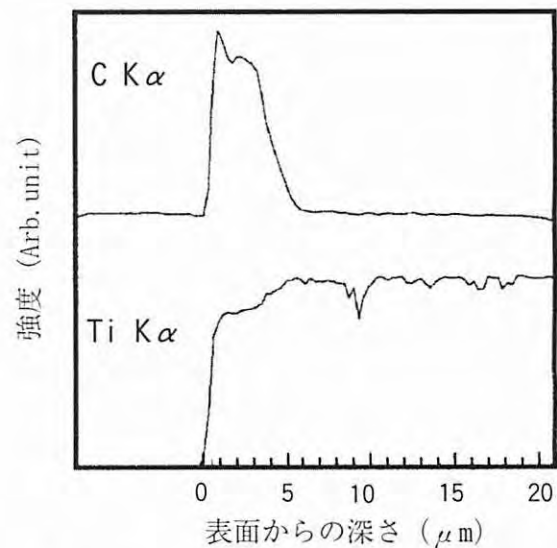


図5 純チタン改質面の EPMA 分析結果

EPMA analysis of EDMed pure titanium surface

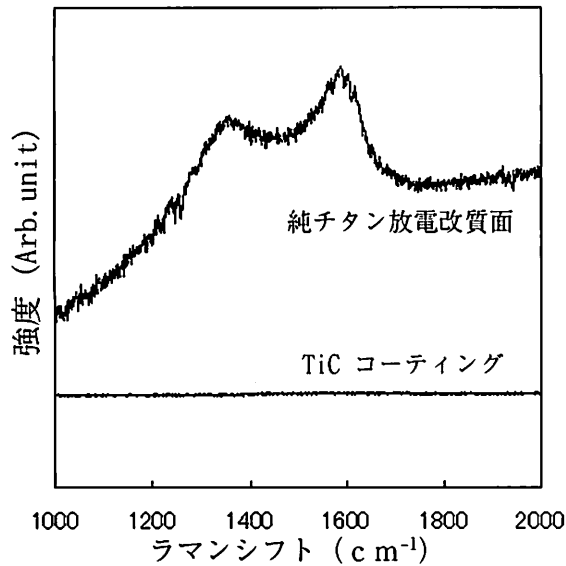


図6 純チタン改質面のラマン分光分析結果
Raman shift of EDMed Ti and TiC coating

硬質皮膜などのコーティング処理とは異なり，拡散処理の一種であると考えられる．一般的に傾斜皮膜は密着性が良好であることが知られており，本皮膜も同様な密着性を有していると考えられる．

図6に純チタンを処理した場合のラマン分光分析の結果を示す．その結果，改質面上にアモルファスカーボン⁹⁾の成分が存在することが確認された．比較対象として測定したPVDによるTiCコーティングではこのような成分は見られない．放電加工での浸炭現象は，ミクロンオーダーの狭い放電ギャップ間において，加工油の熱分解による炭素が非常にリッチな状態で起こっているため，表面にアモルファスカーボンが生成されると考えられる．このカーボンが，しゅう動時に潤滑の役目をすることも考えられる．

4. 改質面の摩擦・摩耗特性

図7に往復しゅう動式摩擦試験機による，各試料の摩擦時間と摩擦係数の関係を示す．純チタン，チタン合金ともに，摩擦時間の経過とともに摩擦係数が増加する傾向が認められ，その変動も大きく，焼付きを起こしやすい特性を示している．一方，放電改質面の摩擦係数は試験開始時からほとんど変動せず，常に安定し，母材より低い値を示す．

図8は摩擦試験後の各試料におけ

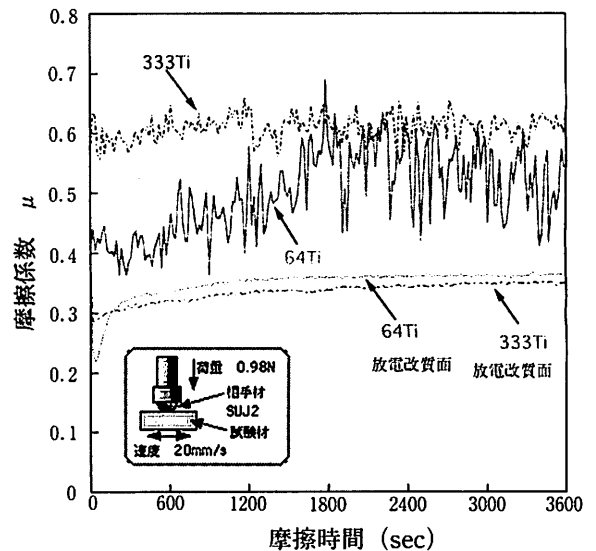
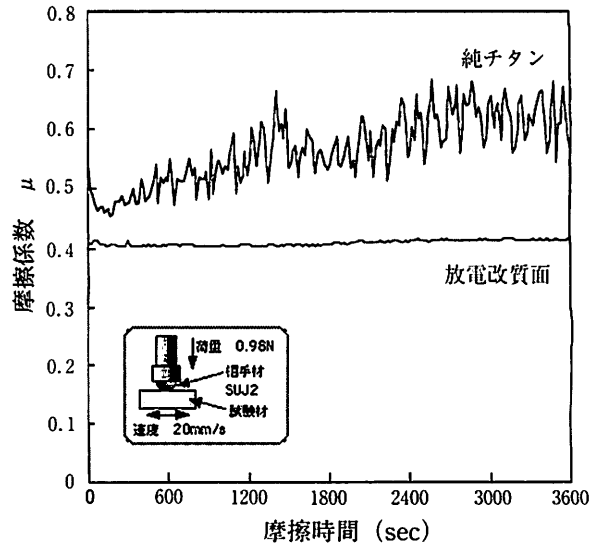


図7 往復しゅう動式摩擦試験結果
Changes in friction coefficient of EDMed surface with sliding time

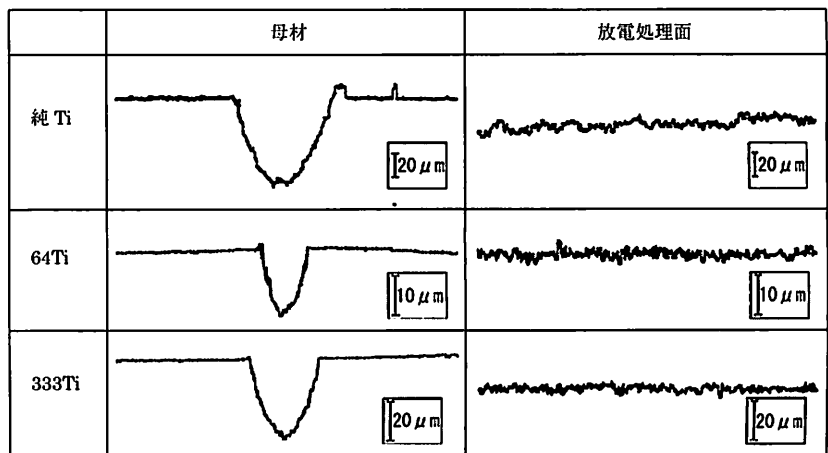


図8 摩擦試験後の摩耗痕
Wear scars after friction test

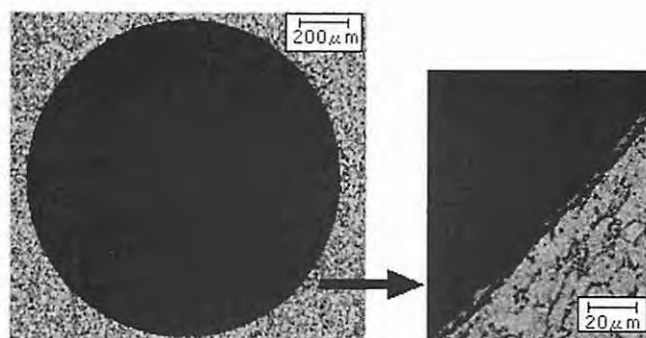


図9 穴の内面処理

EDMed treatment of hole inside

る摩耗痕の断面形状を示す。純チタン、チタン合金ともに深い摩耗痕が生じているが、放電処理面では摩耗痕はほとんど観察されず、母材に対して著しく耐摩耗性が向上している。

5. 穴の内面処理

穴開け処理は放電加工の得意とする分野であり、この技術を応用すれば、通常では処理が困難な、穴の内面の硬化処理が行える。図9に穴の内面処理例を示す。改質層の厚さは約 $5\mu\text{m}$ で一様に形成されており、良好に処理が行えることが確認できた。

6. おわりに

油中の形彫り放電加工によるチタン材料の表面改質を試み、以下の結果を得た。

- (1) 加工表面には高硬度のTiC層が形成される。
- (2) 放電時間の短い、正極性低電流加工では、マイクロクラックの少ない改質層が得られる。

- (3) 表面に形成された改質層は、軸受鋼とのしゅう動試験では、摩擦係数の低減、および、耐摩耗性の改善に効果がある。

参考文献

- 1) 伊藤貴昌：まてりあ, 37 (1998) p.9
- 2) (社)日本チタン協会編：チタンの加工技術, 日本工業新聞社 (1992) p.173
- 3) 高橋 渉, 岡田 稔, 志田善明, 桑山哲也, 阪上雅昭：まてりあ, 34 (1995) p.620
- 4) B. M. Schumacher: Proceedings of the 7th International Symposium for Electromachining ISEM-7 (1983) p.126
- 5) K. Masui, K. Demizu, Y. Sato, T. Sone: Proceedings of the 11th International Symposium for Electromachining, ISEM-11 (1995) p.419
- 6) 塚原秀和, 南 久, 増井清徳, 出水 敬, 曾根 匠：電気加工学会誌, 33, 74 (1999) p.9
- 7) 塚原秀和, 南 久, 出水 敬, 増井清徳, 曾根 匠：熱処理, 43 (2003) p.31
- 8) 塚原秀和, 南 久, 増井清徳, 曾根 匠, 出水 敬：電気加工学会誌, 35, 79 (2001) p.24
- 9) 濱口宏夫, 平松暁子 編：ラマン分光法, 学会出版センター (1988) p.180