

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：53101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14864

研究課題名（和文）放電プラズマ焼結体を工具電極に用いた医療用チタン合金の放電加工

研究課題名（英文）Electrical discharge machining of medical titanium alloy by using spark plasma sintering body tool electrode

研究代表者

金子 健正（Kaneko, Kensei）

長岡工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：60708618

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：医療用チタン合金の放電加工における成形加工とTiNコーティングの同時処理を目的として、TiN工具電極を用いた医療用チタン合金の放電加工特性を明らかにした。TiNに助剤としてTiB₂を添加することで、高い加工速度と低い工具電極消耗を得た。また、加工表面には50μm程度のコーティング層が形成された。コーティング層の厚さは放電時間によって制御が可能である。コーティング層を元素分析した結果、工具電極材料であるTiNが形成されていることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工具電極に材料と加工雰囲気との組み合わせによって医療用チタン合金の放電加工における成形加工とTiNコーティングの同時処理ができることを明らかにした。チタン合金の成形加工とTiNコーティングの同時加工は、微小凹凸による骨適合性とTiNによる無毒で高い細胞親和性を両立している。工学と医学の両分野におけるチタン合金の高付加価値加工法が確立されたといえる。

研究成果の概要（英文）：The characteristics of electrical discharge machining of titanium alloys by using a TiN tool electrode were clarified, aiming at simultaneous machining and TiN coating in EDM of titanium alloys for medical applications. High removal rate and low tool electrode wear were obtained by adding TiB₂ to TiN sintering body as an auxiliary agent. A coating layer of about 50 μm was formed on the machined surface. The thickness of the coating layer can be controlled by the discharge time. Elemental analysis of the coating layer revealed that TiN, the tool electrode material, was formed.

研究分野：加工学および生産工学

キーワード：放電プラズマ焼結 放電コーティング 窒化チタン ホウ化チタン チタン合金 放電時間 元素分析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

チタンは生体親和性の高い金属として知られている。そのため、インプラントなどの歯科用器具や人工関節などの材料として利用されている。近年では、オッセインテグレーションタイプと呼ばれるチタンが顎の骨と結合するチタン合金製インプラントの普及が加速している。チタンの骨適合においては、表面性状が結合に大きく影響を及ぼす。初期の切削などの機械加工表面に代わり、微小凹凸形状の付与やコーティングなどの表面処理を施した新しい時代のチタンインプラントが世界の主流になっている。

一方、これらの用途では複雑形状加工が求められるため、チタン合金部品の形状加工においては形彫り放電加工が用いられる。しかしながら、放電加工においては工具電極に用いられる銅が加工表面に付着する現象が発生する。銅はアレルギーを起こしやすい金属の一つであり、加工表面の研磨加工や洗浄工程が必須である。

2. 研究の目的

本研究では、新たに窒化チタン(以下TiN)を工具電極に用いたチタン合金の放電加工に着目した。TiNはチタンと比較して2倍程度の融点と熱伝導率を示すため、放電加工において溶融除去しにくく、工具電極として優れた熱物性値を持つ。また、TiNはFDAのガイドラインを満たしており、人体に対して無害で細胞親和性に優れている。そのため、インプラント、メス、骨用ノコギリなどのコーティングに使用されている。よって、工具電極のTiNが加工表面に付着しても問題ないばかりでなく、インプラント部品の成形加工と細胞親和性に優れた表面処理、さらには骨結合を促進する微小凹凸形状付与を同時に行える新たな加工法が確立できると考えられる。そこで本研究では、医療用チタン合金の放電加工における成形加工とTiNコーティングの同時処理を目的として、TiN工具電極を用いた医療用チタン合金の放電加工特性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

放電プラズマ焼結法(SPS法)により、TiN焼結体と、焼結助剤に25mol%のTiB₂を配合したTiN-TiB₂焼結体を作製した。焼結体の寸法は、30mm、板厚5mmとした。次に、ワイヤ放電加工機を用いて、それぞれの焼結体を5mmの円柱状に加工した。円柱状に加工した焼結体を、導電性接着剤(CONDUCTLON)を用いて5mmの銅電極の先端に接着し、工具電極とした。

形彫り放電加工機を使用し加工実験を行った。工作物はTi合金(Ti-6Al-4V)を用いた。加工条件を表1に示す。加工液は灯油系放電加工油を用いた。加工時間と工作物及び工具電極の除去体積から、加工速度と工具電極消耗速度を算出した。また、デジタルマイクロスコープを用いて加工表面断面を観察し、加工表面に形成されたTiNコーティング層の厚さを測定した。さらに、エネルギー分散型X線分光法(EDS)を用いて加工表面の元素分析を行った。

表1 加工条件

工具電極	TiN, TiN-TiB ₂
工作物	Ti合金(Ti-6Al-4V)
工具電極直径	5 mm
工具電極極性	(-)
放電時間	2, 8, 32, 75 μs
デューティ・ファクタ	10 %
放電電流	20 A
無負荷電圧	200 V
サーボ電圧	100 V
加工送り深さ	1.0 mm

4. 研究成果

各工具電極材料における加工速度を図1に示す。TiN焼結体を工具電極に用いた場合、放電時間が長いほど加工速度は低くなり、放電時間75μsにおいてはほとんど工作物が加工されなかった。一方、TiN-TiB₂焼結体を工具電極に用いた場合は、TiN焼結体を用いた場合と比較して加工速度は2倍程度高くなった。放電時間が長いほど加工速度は低下したが、放電時間32μs以上ではほぼ一定の値となった。

各工具電極材料における工具電極消耗速度を図2に示す。TiN焼結体を工具電極に用いた場合、放電時間が長いほど工具電極消耗速度は大きくなった。一方、TiN-TiB₂焼結体を工具電極に用いた場合は、放電時間が長くなっても工具電極消耗速度は一定となった。また、TiN焼結体を用いた場合と比較して、工具電極消耗速度は低くなった。

以上の結果から、Ti合金の放電加工においては、TiN-TiB₂焼結体を工具電極に用いることで良好な放電加工特性を示すことが分かった。TiN焼結体とTiN-TiB₂焼結体の破断面を観察し、結

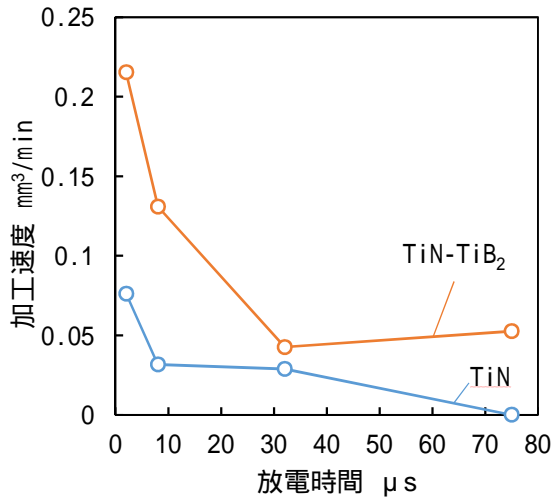


図1 各工具電極材料における放電時間が加工速度に及ぼす影響

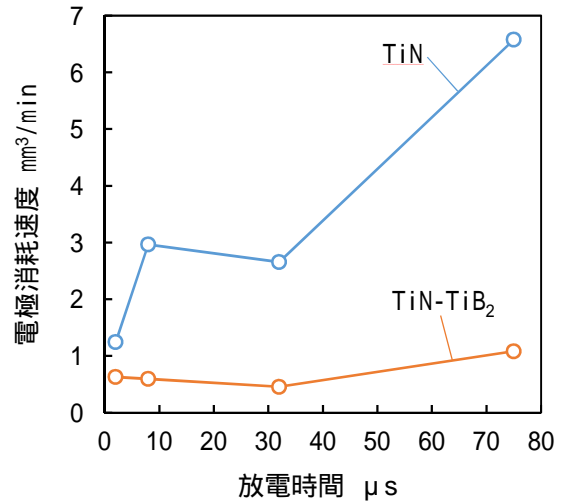


図2 各工具電極材料における放電時間が工具電極消費速度に及ぼす影響

晶粒径を測定すると、TiN 焼結体は結晶粒が粒成長によって粗大化していることが分かった。そのため、結晶粒の脱落によって消耗が促進されたと推測される。これに対して、TiB₂を焼結助剤として添加すること、焼結中における結晶粒の粒成長が抑えられ、粉末粒径と結晶粒径が同程度になったと考えられる。

各工具電極における加工表面断面の観察結果を図3に示す。TiN 焼結体を工具電極に用いた場合、加工表面に形成されたTiN コーティング層は10 μm程度であり、放電時間が変化しても皮膜厚さは変化しなかった。一方、TiN-TiB₂ 焼結体を工具電極に用いた場合は、TiN 焼結体を用いた場合と比較して皮膜厚さが厚く、放電時間が長いほど皮膜厚さは厚くなる傾向が認められた。このことから、TiN-TiB₂ 焼結体を工具電極に用いることで、放電時間によってTiN コーティング層の厚さが制御できることが分かった[1]。

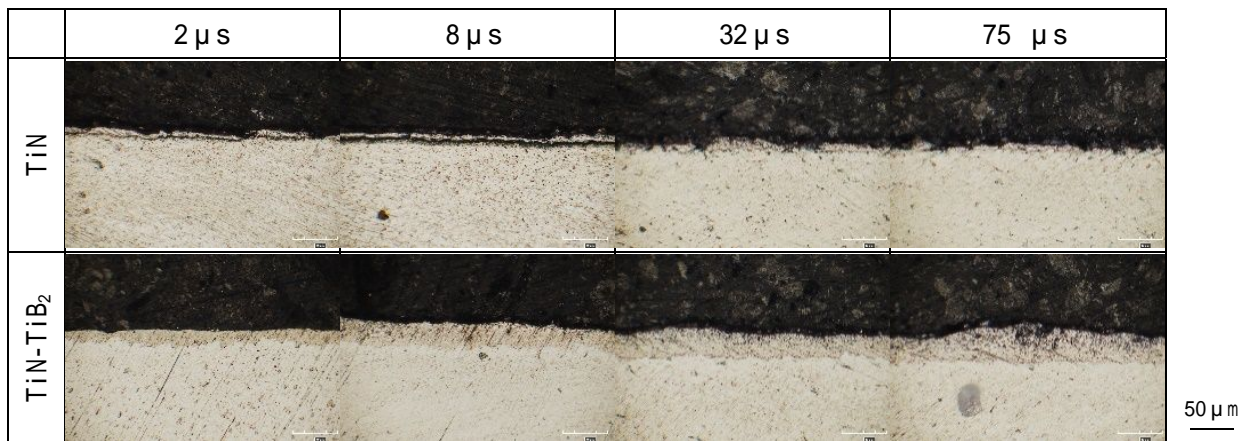
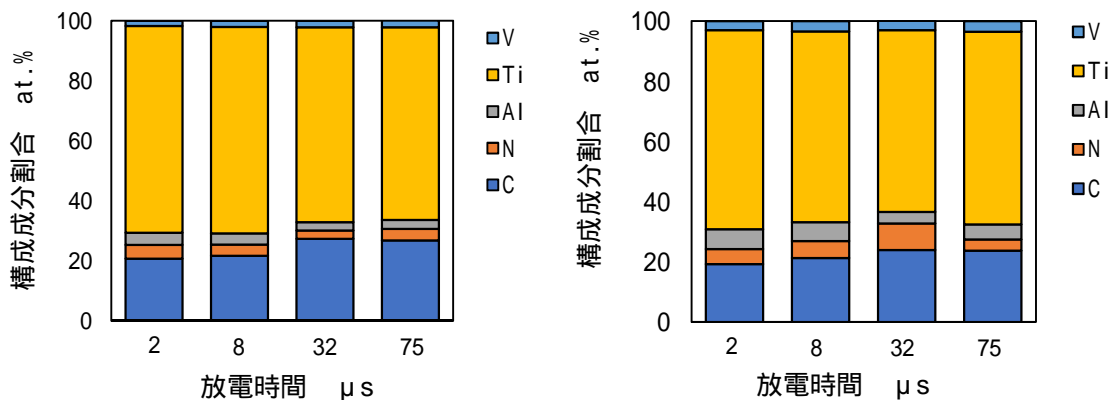


図3 各工具電極材料における放電時間がTiN コーティング層の形成に及ぼす影響



(a) 工具電極材料 : TiN

(b) 工具電極材料 : TiN-TiB₂

図4 各工具電極材料における加工表面の元素分析

各工具電極における加工表面の元素分析の結果を図 4 に示す。いずれの工具電極を用いた場合においても、V, Ti, Al, N, C が検出され、それぞれの構成割合は同程度だった。また、放電時間が長いほど C の割合が多くなった。この結果から、TiN コーティング層は、TiN のほかに母材である Ti, Al, V と加工油の熱分解カーボンである C によって構成されていると考えられる [2]。

<引用文献>

- [1] 金子健正, 小出学, Jabri KHALED: TiN 焼結体を工具電極に用いた放電コーティング, 第 24 回通電焼結 (SPS) 研究会
- [2] 中沢真奈也, 金子健正, 小出学, KHALED Jabri: TiN 焼結体をを用いた Ti 合金への放電コーティング 時間経過に伴う被膜形成, 日本機械学会北信越支部第 50 回学生員卒業研究発表講演会

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kensei Kaneko, Rintaro Tamura, Takeru Seki, Keita Kabasawa, Kotaro Kibe, Naoya Yamaguchi, Makoto Nanko	4. 巻 in press
2. 論文標題 Evaluation of Releasability Between Molding Resin and MAX Phase Ceramics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions on GIGAKU	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 金子健正, 青柳成俊	4. 巻 53
2. 論文標題 解説 放電プラズマ焼結体を用いた放電コーティング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 174-179
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Saito, Tomoki Kuribayashi, Kensei Kaneko, Naoya Ymaguchi, Hirotaka Kawasaki, Makoto Nanko	4. 巻 25
2. 論文標題 Electrical Discharge Machining by Using MAX Phase Ceramic Tool Electrodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical Machining	6. 最初と最後の頁 21-26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Keita Kabasawa, Kotaro Kibe, Kensei Kaneko, Naoya Yamaguchi, Makoto Nanko
2. 発表標題 Mold Releasability Evaluation of MAX Phase Ceramics
3. 学会等名 6th STI-Gigaku 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 品田健陽, 金子健正, 山口直也, 南口誠
2. 発表標題 放電加工されたMAX相セラミックスの機械的性質 - 熱影響層の組成分析 -
3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗林朋希, 金子健正, 山口直也, 南口誠
2. 発表標題 MAX 相セラミックスを工具電極に用いた放電加工 (第2報) - 仕上げ加工条件における加工特性 -
3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中将太郎, 金子健正, 山口直也, 南口誠
2. 発表標題 MAX相セラミックスの微細穴加工
3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中沢真奈也, 金子健正, 小出学, KHALED Jabr i
2. 発表標題 TiN焼結体を用いたTi合金への放電コーティング - 時間経過に伴う被膜形成 -
3. 学会等名 日本機械学会北信越支部第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗林朋希, 齋藤祐功, 金子健正, 山口直也, 川崎裕貴, 南口誠
2. 発表標題 MAX相セラミックスを工具電極に用いた超硬合金の放電加工
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中将太郎, 金子健正, 山口直也, 川崎裕貴, 南口誠
2. 発表標題 MAX相セラミックスの微細放電加工特性
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 品田健陽, 金子健正, 山口直也, 川崎裕貴, 南口誠
2. 発表標題 放電加工されたMAX相セラミックスの機械的性質
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 TiN焼結体を工具電極に用いた放電コーティング
2. 発表標題 金子健正, 小出学, Jabri KHALED
3. 学会等名 第24回通電焼結 (SPS) 研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤祐功, 栗林朋希, 金子健正, 山口直也, 川崎裕貴, 南口誠
2. 発表標題 MAX相セラミックスを工具電極に用いた放電加工 - 加工電気条件が加工特性に及ぼす影響 -
3. 学会等名 電気加工学会全国大会 (2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤祐功, 金子健正, 山口直也, 川崎裕貴, 南口誠
2. 発表標題 MAX相セラミックスを工具電極に用いた放電加工に関する基礎的研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子周平, 金子健正, 山口直也, 川崎裕貴, 南口誠
2. 発表標題 MAX相セラミックスの放電加工特性
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------