

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03884

研究課題名（和文）電解作用を併用した研削加工による超硬合金の高効率高品位加工技術の開発

研究課題名（英文）Development of high-efficiency, high-quality machining technology for sintered carbide by grinding with electrolytic action

研究代表者

後藤 昭弘（Goto, Akihiro）

静岡理工科大学・理工学部・教授

研究者番号：00711558

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：超硬合金の高速高精度な加工方法として、電解作用を利用した研削加工法の開発を行った。電解作用によりCoを溶出させ、脆弱化した超硬合金を絶縁性の砥粒で削り取る方法である。

まず、電解作用による加工面の反応について調べた。超硬合金の成分であるCoをイオン化する反応がはじめに起き、それに続いて、WCの酸化の反応が起きることがわかった。実際の加工試験において、電解作用を用いた場合に、加工負荷を低減できることを示した。

また、Crを含む材料を加工することを想定し、六価クロムの生成防止技術の研究を行った。二価の鉄イオンを電解液中に供給することにより、六価クロムが生成する現象を抑えることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ものづくり現場では、機械部品を精度よく、安価に大量に作るための方法として、冷間鍛造金型を超硬合金化することが注目されている。しかし硬質材料であるため、加工が困難であり、広い普及には至っていない。超硬合金の高速高精度な加工方法として、研削加工に電解加工の作用を複合させることで、加工効率を高めることができるようになり、超硬合金を使用する問題の一つを解決できると考える。また、電解作用を利用する際に問題になる六価クロム生成の問題についても、解決する方法を提供することができるようになると思う。

研究成果の概要（英文）：As a high-speed and high-precision machining method for sintered carbide, we have developed a grinding method that utilizes electrolysis. This is a method in which Co is eluted by electrolytic action and the fragile sintered carbide is scraped off with insulating abrasive grains.

The reaction of the surface due to the electrolytic action was investigated. It was found that the ionization and elution of Co, which is a component of sintered carbide, occurs first, followed by the reaction of WC oxidation. In the actual machining test, it was shown that the machining load can be reduced when the electrolytic reaction was used.

In addition, assuming materials containing Cr will be machined, we conducted research on hexavalent chromium formation prevention technology. By supplying divalent iron ions into the electrolyte, the phenomenon of hexavalent chromium formation could be suppressed.

研究分野：電気加工

キーワード：電解 ミーリング 超硬合金

1. 研究開始当初の背景

高精度な部品を大量に製造するために金型材料の超合金化が進んできている。しかし、超合金はその高い硬さのため、加工が難しいという問題がある。一般的には超合金は放電加工により加工されることが多いが、加工速度が遅く、表面にマイクロクラックが入るといった問題がある。一方、近年、切削工具の分野で大きな技術進歩があり、超合金でも加工できるようになってきている。しかし、加工速度が遅い上、工具費用が非常に高いという問題がある。本研究では、電解現象を利用して、超合金を高速に加工できる技術を開発することを目指した。

2. 研究の目的

本研究は将来的に、冷間鍛造金型等を対象にした超合金の3次元形状の高速加工を、エンドミルのような回転工具により実現することを目指している（以下、本方法を「電解複合ミーリング法」と呼ぶ）。特に高速加工が求められている超合金の荒加工を主な対象としている。今回の研究では、提案する加工方法の原理を確認し、有効性を示すことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 超合金表面の電解現象の調査：電解作用による加工面の反応について調べた。電解現象のみで超合金の表面の成分にどのような変化が生じるかについて調べた。エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) により分析して、各元素の量を調べた。

(2) 加工試験：(1)の結果に基づき、超合金の電解複合ミーリング法による加工試験を行った。電解作用のありなしで加工の負荷がどのように変わるか比較した。

(3) 加工面の分析・加工層の分析：加工面・加工層を分析し、加工の原理について考察した。

(4) 六価クロムの生成防止：Cr を含む材料を加工する場合に問題になる六価クロムの生成を抑えるための方法について検討した。

4. 研究成果

(1) 超合金表面の電解現象の調査：電解作用による加工面の反応について調べた。超合金の成分である Co をイオン化して溶出させる反応がはじめに起き、それに続いて、WC の酸化の反応が起きることがわかった。図 1 にその結果を示す。図において、横軸は電解の時間、縦軸は、▲点は C/W の値、■点は O/W の値、●点は Co/W の値（それぞれエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による mass% の比) を示している。直流での電解加工では超合金のタングステン W は減少しないと考えられるので、分析結果の W の mass% の値を基準として、炭素 C、酸素 O、コバルト Co の mass% との比をグラフにした。この結果から、電解複合ミーリング法では、電解の電荷を Co の溶出に集中的に使用することができ、Co を溶出させた直後に効率よく超合金の WC を除去加工が可能であることがわかった。

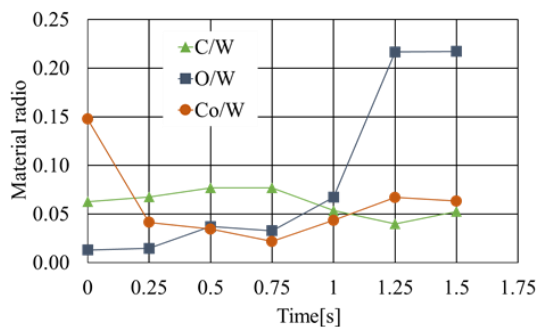


図 1 超合金表面の電解現象

(2) 加工試験：電解現象を利用したミーリング加工実験を行った。今回の実験では図 2 に示すように工具の先端半径 5mm の、粒径約 50 μm のダイヤモンドを電着したボールタイプの工具を使用した。実験に用いた装置の構成を図 3 に示す。超合金を加工する際の切削抵抗を測定するため、ひずみゲージを鋼材のブロックに貼り、ロードセルとした。今回の切削試験では、切削時の力が図 3 で右向きに加わるように、手前の面を、工具を右向きに動かして加工した。加工

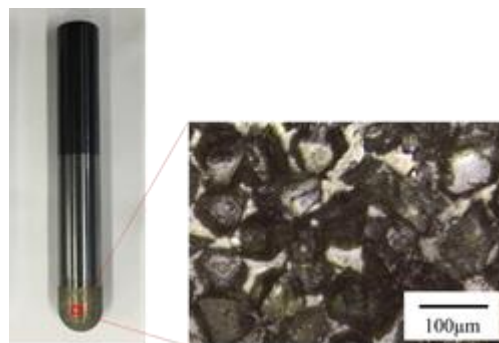


図 2 工具

前に、超合金の左端に力を与えて力とひずみゲージのアンプの出力電圧（以下、出力電圧）の関係を取り、キャリブレーションを行った(図 4)。●点はキャリブレーションするために測定

した点であり、直線はキャリブレーション線である。軸方向に約 4.3mm、半径方向 40 μ m の切り込みで、工具の側面部分で加工した。送り速度 238mm/min、工具の回転数は 3600rpm とした。電解液は、約 13%の NaNO_3 水溶液を使用した。電解作用のありなしで加工時の力を比較した結果を図 4 内に示す。ノイズが大きく定量的な評価は難しいが、平均して見ると力の大小は十分に判別でき、電解作用を用いることで切削の負荷を下げられることがわかった。

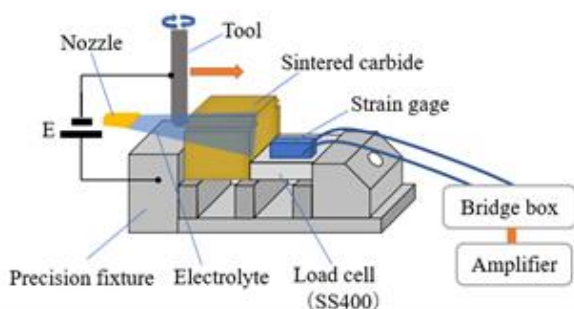


図 3 実験装置の外観

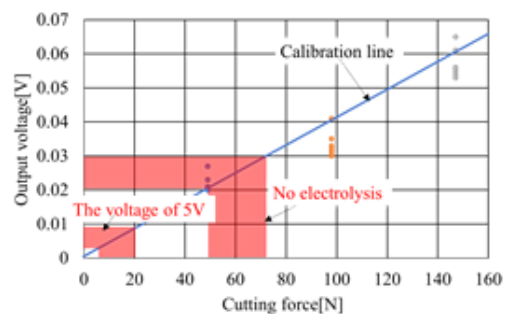


図 4 キャリブレーション

(3) 加工面の分析・加工屑の分析：切削抵抗が低減できた理由について調べるため、電解作用のありなしで加工面の比較を行った。それぞれの面を EDS により元素分析した結果を表 1 に示す。この実験に使用した超硬合金は、WC 87%、Co 13%であるので、電解無しで加工した面は、ほぼその成分の比率になっている。一方、電解有りの条件で加工した面では、Co の量が大きく減少していることがわかる。このことから、切削抵抗が低減できた理由は、Co の溶出による加工部位の材料脆弱化にあると考えることができる。電解ありの加工面と電解なしの加工面とで、酸素の量がほとんど変化のないことから、今回の電解の条件では、電荷の多くが、Co の溶出に使われたと推測できる。

電解ありの条件で超硬合金の表面に起きた反応を確認するため、加工屑を採取して、その成分を X 線回折装置 (XRD) により分析した。その結果を図 5 に示す。■点は WC、○点は C である。すなわち、加工屑からは WC と C のみ検出され、 WO_3 と CoO は検出されなかった。以上の結果から、今回の条件では電解により Co が Co^{2+} として溶出する反応が主に起き、酸化物が生成する前に除去加工ができていくことがわかる。

表 1 電解ありなしの加工面の比較

Element	0V (without electrolysis)	5V (with electrolysis)
C	7.6	7.1
O	2.2	1.8
Co	11.8	3.1
W	78.4	88.1

(Mass%)

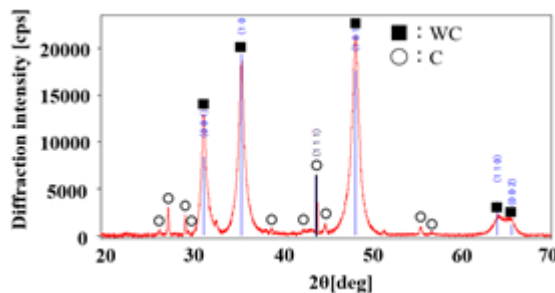


図 5 加工屑の XRD 分析

(4) 六価クロムの生成防止：Cr を含む材料を加工する場合に問題になる六価クロムの生成を抑えるための方法について検討した。電解液を図 6 に示すような鉄の切粉を詰めた装置に通すことで鉄イオン (Fe^{2+}) を供給できることを示した (図 7)。図 8 は Cr を含む材料を加工中の電解液中の鉄イオン (Fe^{2+}) 濃度と六価クロム濃度の推移を示したグラフである。電解液中の鉄イオン (Fe^{2+}) が Fe^{3+} になる反応を利用して、Cr が六価クロムになる反応を抑えることができることを示した。

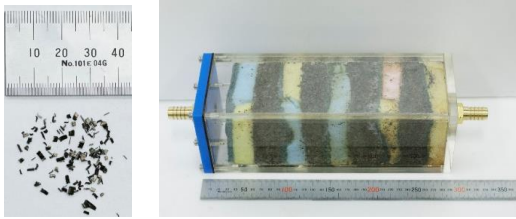


図6 鉄イオン供給装置

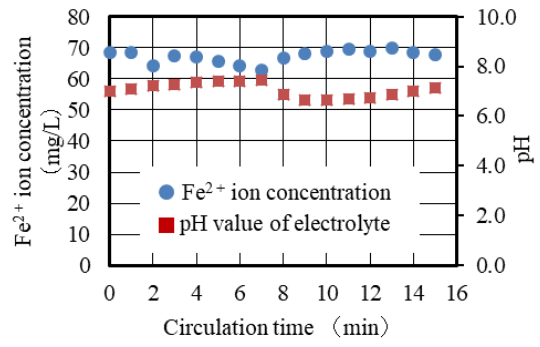


図7 電解液の pH 値と鉄イオン濃度

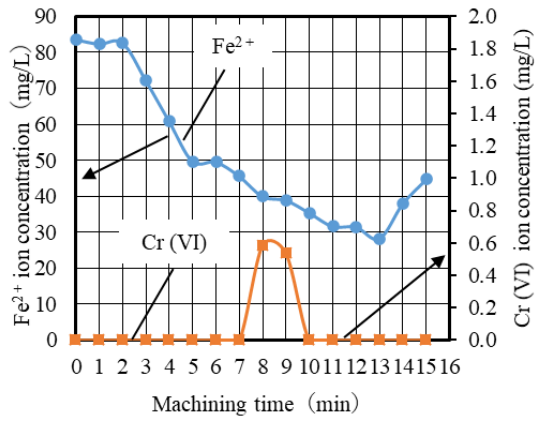


図8 電解加工中の電解液のイオン濃度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 王思聰, 後藤昭弘, 小土橋陽平, 中田篤史, 陳俊達, 陳彦東, 早川邦夫	4. 巻 54
2. 論文標題 Crを含む鋼材の電解加工における鉄イオン添加電解液による六価クロム生成防止の研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 2-9
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 王思聰, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 脇川祐介, 坂部晃紀, 陳俊達, 早川邦夫	4. 巻 54
2. 論文標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 - 切削抵抗の測定と加工現象の調査 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 22-30
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 陳俊達, 王思聰, 坂部晃紀, 後藤昭弘	4. 巻 34
2. 論文標題 電解現象を利用した超硬合金の高速ミーリング加工の研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 18-19
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 陳彦東, 陳俊達, 王思聰, 後藤昭弘, 小土橋陽平	4. 巻 43
2. 論文標題 クロム含有鋼材の電解加工における鉄イオン添加電解液による六価クロム生成防止の研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気加工技術	6. 最初と最後の頁 5-11
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 Akihiro Goto, Sicong Wang, Yohei Kotsuchibashi, Atsushi Nakata, Junda Chen, Yandong Chen, Kunio Hayakawa	4. 巻 26
2. 論文標題 Prevention of Hexavalent Chromium Formation by Iron-ion-added Electrolyte in Electrochemical Machining of Chromium-containing Steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical Machining (IJEM)	6. 最初と最後の頁 16-24
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akihiro Goto, Sicong Wang, Atsushi Nakata, Kosuke Shirai, Yusuke Wakikawa, Koki Sakabe, Junda Chen, Kunio Hayakawa	4. 巻 26
2. 論文標題 Milling of Sintered Carbide using Electrochemical Reaction - Measurement of cutting force and investigation of machining phenomena -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical Machining (IJEM)	6. 最初と最後の頁 9-15
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 王思聰, 坂部晃紀, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 脇川祐介, 早川邦夫, 酒井克彦	4. 巻 Vol.42, No.132
2. 論文標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 - 切削抵抗の測定と加工現象の調査 -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気加工技術	6. 最初と最後の頁 13-18
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 陳俊達, 後藤昭弘, 小土橋陽平	4. 巻 Vol.44, No.138
2. 論文標題 Crを含む鋼材の電解加工における鉄イオン添加電解液による六価クロム生成防止の研究 (第2報)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気加工技術	6. 最初と最後の頁 1-6
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 陳俊達、後藤昭弘、中田篤史	4. 巻 Vol.35, No.12
2. 論文標題 電解現象を利用した超硬合金の高速ミーリング加工の研究(第2報)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 040-041
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 後藤昭弘、陳俊達、中田篤史	4. 巻 Vol.36, No.6
2. 論文標題 電解現象を利用した超硬合金の高速ミーリング加工の研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 068-071
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 後藤昭弘、小土橋陽平、陳俊達	4. 巻 55
2. 論文標題 Crを含む鋼材の電解加工における鉄イオン添加電解液による六価クロム生成防止の研究(第2報)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 11月発行予定
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Sicong Wang, Akihiro Goto, Atsushi Nakata, Yusuke Wakikawa, Kosuke Shirai, Kunio Hayakawa
2. 発表標題 Study on Milling for Sintered Carbide Using Electrochemical Reaction
3. 学会等名 International Conference on Mechatronic, Automobile, and Environment Engineering(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳俊達, 陳彦東, 王思聰, 後藤昭弘, 小土橋陽平
2. 発表標題 鉄イオン添加電解液による六価クロム生成防止の研究
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王思聰, 後藤昭弘, 中田篤史, 脇川祐介, 白井康介, 早川邦夫
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 -加工条件の加工面への影響と加工現象の調査-
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳俊達, 王思聰, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 脇川祐介
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 -加工条件の加工面への影響-
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 陳彦東, 陳俊達, 王思聰, 後藤昭弘, 小土橋陽平
2. 発表標題 鉄イオン添加電解液による六価クロム生成防止の研究 -鉄イオン濃度低下防止の方法-
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 陳俊達, 王思聰, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 脇川祐介
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 - 電解条件の選定 -
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陳彦東, 陳俊達, 王思聰, 後藤昭弘, 小土橋陽平
2. 発表標題 鉄イオン添加電解液による六価クロム生成防止の研究 - 鉄イオンの連続供給の方法 -
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 王思聰, 坂部晃紀, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 脇川祐介, 早川邦夫, 酒井克彦
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 - 切削抵抗の測定と加工現象の調査 -
3. 学会等名 電気加工学会第224回電気加工研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 王思聰, 坂部晃紀, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 早川邦夫, 酒井克彦
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 電解条件の切削抵抗低減への影響
3. 学会等名 電気加工学会全国大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂部晃紀, 王思聰, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 脇川祐介
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 切削メカニズムの調査
3. 学会等名 電気加工学会全国大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂部晃紀, 王思聰, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 脇川祐介
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 - 電解条件の加工面への影響 -
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳俊達, 後藤昭弘, 中田篤史
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工の研究 - Coの溶出現象の調査 -
3. 学会等名 電気加工学会全国大会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 焦思琦, 陳俊達, 後藤昭弘, 中田篤史, 白井康介, 脇川祐介
2. 発表標題 電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工 -加工原理に対する考察-
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 加工装置及び加工方法	発明者 後藤昭弘、王思聰、 白井康介	権利者 静岡理科大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019 15224	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
連携研究者	中田 篤史 (NAKATA ATSUSHI) (70635028)	静岡理科大学・理工学部電気電子工学科・准教授 (33803)	

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
---------	---------