

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03794

研究課題名（和文）電解溶出現象を利用した電解複合ミーリングの加工メカニズムの解明と制御に関する研究

研究課題名（英文）Research on elucidation and control of machining mechanism of electrochemical composite milling using electrochemical dissolution phenomenon

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：これまでに、電解加工を併用したミーリング加工の開発を進めてきた。超硬合金の成分であるCoを電解により溶出させ、Coが溶出して脆くなった部分を絶縁性の切れ刃で削り取る方法である。これまでに本方法で加工効率を高められることを示してきたが、安定して加工を連続することが困難であることもわかってきた。そこで、高効率な加工を安定して継続できる技術とすることを目指した。電解反応の効果を上げるため、重切削加工を試み、電解無しの場合の5倍以上の速度で加工できることを示した。しかし、加工屑が工具に詰まり、加工が連続できなくなる問題が生じた。その対策として、逆電解法と超音波洗浄法を組み合わせる方法を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高精度な部品を大量に製造するために金型材料の超硬合金化が進んできている。しかし、超硬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。一般的には超硬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、超硬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。本研究により、難加工材料の代表である超硬合金を高速に加工ができるようになり、ものづくりの生産性を高めることにつながる。

研究成果の概要（英文）：So far, we have been developing milling processing combined with electrolytic processing. This method involves dissolving Co, a component of cemented carbide, through electrolysis, and then cutting away the brittle parts that have become brittle due to the dissolution of Co with an insulating cutting edge. This method can increase the machining efficiency, but it is difficult to perform stable, continuous machining. Therefore, we aimed to develop a technology that can perform stable, continuous, highly efficient machining. In order to increase the effect of the electrolytic reaction, we attempted heavy cutting processing, and demonstrated that it is possible to perform machining at a speed more than five times faster than without electrolysis. However, we encountered a problem where cutting chips would clog the tool, making it impossible to continue machining. As a countermeasure, we discovered a method that combines reverse electrolysis and ultrasonic cleaning.

研究分野：電気加工

キーワード：電解加工 ミーリング 複合加工 超硬合金 コバルト

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硬合金化が進んできている。しかし、超硬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。一般的には超硬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、超硬合金でも加工が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。これまでに、電解加工を併用したミーリング加工の開発（図1）を進めてきた。超硬合金の成分であるCoを電解により溶出させ、Coが溶出して脆くなった部分を絶縁性の切れ刃で削り取る方法である。これまでに本技術で加工効率を高められることを示した。一方で、加工の安定性が得られない場合が出てくることになり、本方法の加工原理が、これまで考えていたような単純なものではないことがわかってきた。そこで、本研究では、本加工方法の加工原理を詳細に調べ、高効率な加工を安定して継続できる技術とすることを目指した。

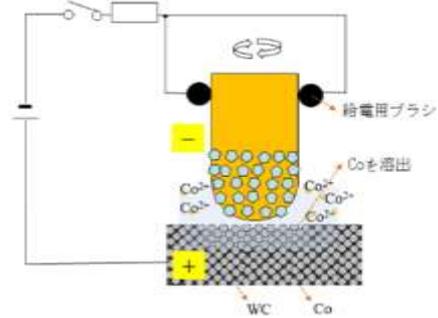


図1 電解複合ミーリング法

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硬合金の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硬合金の荒加工を主な対象としている。今回の研究では、本加工方法の加工原理を詳細に調べて明らかにし、高効率な加工を安定して継続できる技術とすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 超硬合金に起きる電解現象の調査：電解複合ミーリング法により加工する際の電解作用の状態について調べた。これまでに行ってきた浅切込みの加工方法では電解電流を大きくすることが困難であったが、その結果の妥当性について調べ、高速加工を実現するために電解電流を上げる方法（重切削の方法）を検討した。

(2) 加工現象の調査：(1)の結果に基づき、工具の半径方向の切込みを大きくした重切削の方法で、超硬合金の電解複合ミーリング法による加工試験を行った。その際の加工現象について調査し、問題点を抽出した。

(3) 加工阻害要因の対策：(2)により明らかとなった問題の対策について検討した。重切削により、工具に加工層が詰まり、電解現象を起こせなくなっていくことがわかった。その対策として、逆電解法を検討した。工具に詰まった加工層の主成分が工作物である超硬合金の成分である炭化タングステン（WC）であることに注目し、電解作用を起こす場合は逆の電圧を短時間印加することで、詰まった加工層を酸化させて絶縁物化し、加工を継続させる方法である。

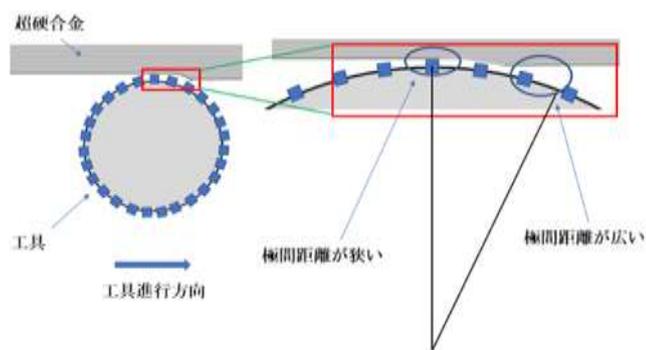


図2 超硬合金表面の電解現象

4. 研究成果

(1) 超硬合金に起きる電解現象の調査：従来のような浅切込みの加工において電解電流が上げられない現象について調査した。加工中の様子を図2に示すようなモデルで考え、極間距離に応じて、流れる電解電流の電流密度を別途実験により求めて、加工中に流れる電流値を計算すると、実際の加工中に流れる電流値とほぼ一致することがわかった。そこで、電解電流を上げて、加工速度を上げるため、図3のような重切削の方法を検討することとした。

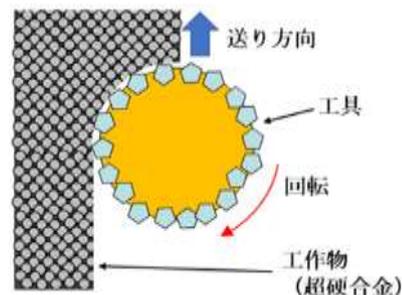


図3 電解電流上昇の方法

(2) 加工現象の調査

加工実験のための装置を製作した（図4）。榎本工業株式会社製 CVN-300G をベースとし、セラミクスボールを用

いたベアリングを用いてスピンドルを絶縁し、工作物はセラミックスプレートを敷いて機械本体から絶縁した。工具への給電はスピンドルの回転軸上に取り付けた接触子(クロム銅)に給電ブラシ(カーボンブラシ)を押し当てて行った。加工実験にはφ10mmのダイヤモンド電着工具を使用した。

加工試験は図5に示すように、表1の条件で行った。この実験では、半径方向の切込みを5mmとし、軸方向の切込みを4mmとした。工具と工作物の間に電解液を軽く吹きかけながら加工した。工具送り速度の条件を変えて加工を行い、それぞれの加工条件での電解の電流を調べた。各条件で1分間加工した。その結果を図6に示す。横軸は工具の送り速度であり、縦軸は各条件での電解の電流値である。工具送り速度が1mm/min程度までは、送り速度が速くなると電解の電流が高くなる傾向が見られた。工具送り速度が1mm/min程度以上になると、電流値が30~35A程度でほぼ同じになった。工具送り速度が1.2mm/minを超える頃から、オシロスコープで極間の電圧・電流波形を観察すると、時々放電の発生が見られるようになり、工具送り速度が速くなるに従い、頻度が上がった。工具送り速度が2.2mm/minでは短絡が発生したので、加工を停止した。比較のため、電解なしで同様の加工実験を行った。電解ありの場合の加工と同じように電解液をクーラント代わりに吹きかけながら加工した。電解なしの場合には、0.3mm/minの送り速度の加工はできたが、0.4mm/minの場合は、機械の過負荷エラーのため加工ができなかった。すなわち、この加工実験の条件では、電解を行うことで、電解なしの場合の5倍以上の速度で加工できたことになる。しかし、図6に示すように約30Aの電流が流れた場合に、その電荷がすべてCoの溶出に使われたと仮定して計算した加工速度、すなわち、Coが溶出する範囲の超硬合金をすべて除去できた場合の速度(約14mm/min)と比較すると、加工速度は著しく遅かった。そこで、加工中に起きている現象を詳しく調べることにした。

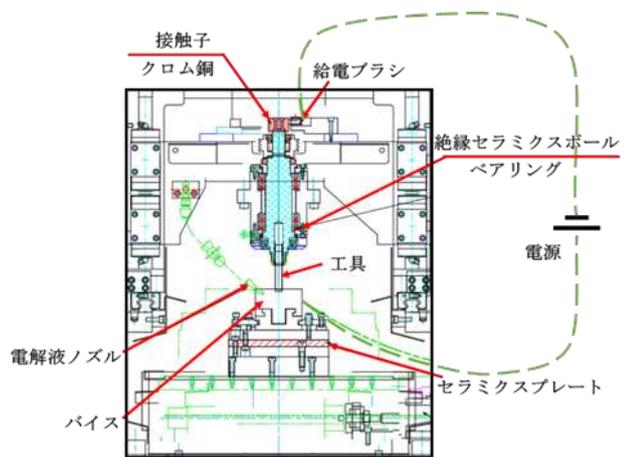


図4 実験装置の構成図

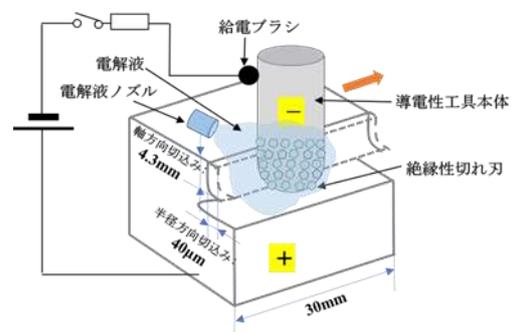


図5 加工実験の方法

表1 加工条件

工作物	超硬合金(WC 87%, Co 13%)
電解液	13% NaNO ₃ 水溶液
工具回転数	3600rpm
軸方向切込量	4mm
半径方向切込み量	5mm
工具送り速度	0.3mm/min~2.2mm/min
加工時間	各条件約1分程度
印加電圧	5V

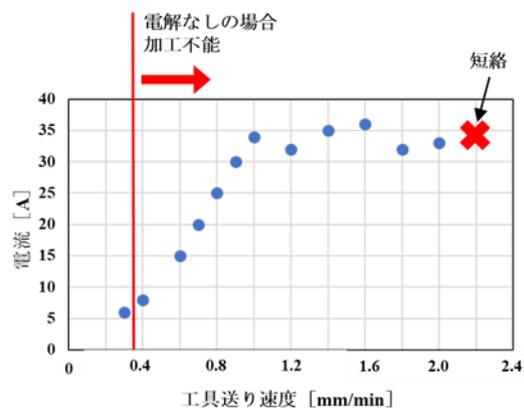


図6 加工結果

(3) 加工阻害要因の対策

加工速度を電解電流の値から計算される速度まで上げられない理由について調査した。加工試験に用いたそれぞれの条件で加工を行った工具の状態を図7に示す。この図から、工具送り速度が大きくなるに従い、砥粒の間に加工屑が付着していることがわかる。工具の加工部分をテスターによって測定した結果、導電性が確認された。このことから、放電が発生した原因は、電着工具の砥粒間に導電材料である WC が詰まり、適切な極間距離が保たれずに加工が行われたことであると考えられる。上記の結果から、本方法で高速加を実現させるためには、加工中の放電や短絡を防止することが必要であり、工具の構造の見直しや、工具への加工屑の詰まりの防止方法を考える必要がある。

そこで、加工屑の詰まりの対策として、放電が発生したタイミングで工具と工作物の極性を変えて電圧を印加すること(以下、この工程を逆電解と呼ぶ)で、工具に詰まった加工屑を排出、あるいは酸化させ絶縁材料にすることを狙った。実験では、過去の実験で使用した、すでに加工屑が詰まっている工具を使用した。また、機械の負荷を軽減させるため切込みは2mmとした。工具送り速度1.4mm/minとし、加工を行ったところ、約4分後に放電が見られた。このタイミングで、工具の送り、電圧を停止させ、極性を反対にし、約10秒間逆電解を行った。逆電解時の電流は3A程度であった。その後、極性を戻して加工を再開したところ、逆電解前は14~16A程度流れていた電流が9~10A程度に減少したものの、加工はスムーズにでき、およそ3分半後に再度放電が見られた。逆電解の工程を行わない場合、加工速度を与えるとすぐに放電が起こることから、逆電解すると、工具寿命が回復することがわかった。それぞれの工具表面をテスターで測定したところ、逆電解前は導電性を、逆電解後は絶縁性を示した。逆電解により、目詰まりの問題自体は解決されなかったが、付着した加工物が酸化することで一定時間工具寿命を延ばすことができた。そこでさらに、逆電解により絶縁物化した加工屑に超音波を付与することで除去することを試みた。図8に「逆電解+超音波付与」の前後の工具表面の写真を示す。「逆電解+超音波付与」により、詰まった加工屑が除去できていることがわかる。電解複合ミーリング法により、超硬合金を高速に連続加工する方法を提示することができたと言える。今後実施の加工のプロセスの中で、電解液に超音波を付与しつつ加工を行う技術へとつなげる予定である。

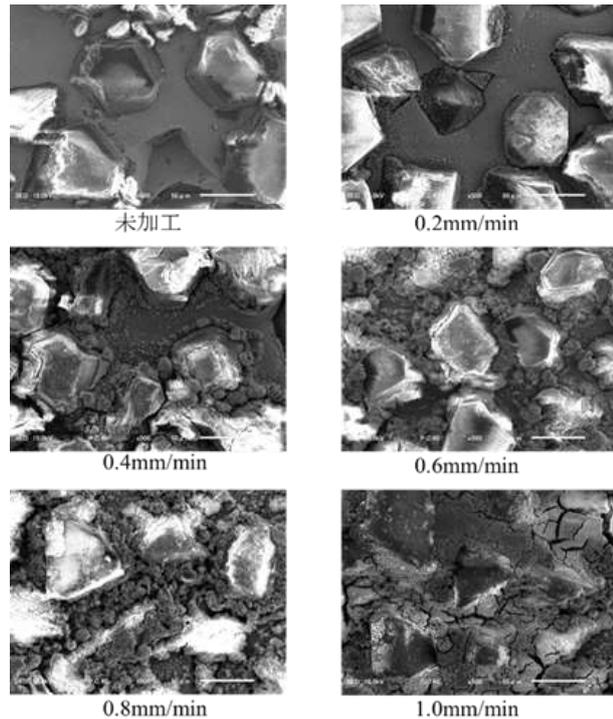


図7 各送り速度毎の工具表面の状態



(a)逆電解前 (b)逆電解+超音波洗浄後

図8 逆電解+超音波洗浄の効果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7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 1件）

1. 著者名 Akihiro Goto, Junda Chen, Kosuke Shirai	4. 巻 16
2. 論文標題 Milling of Sintered Carbide using Electrochemical Reaction - Investigation of Machining Phenomena -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology,	6. 最初と最後の頁 862-869
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, Junda Chen	4. 巻 2022
2. 論文標題 Milling of Sintered Carbide via Electrochemical Reaction - Investigation of factors of machining inhibition -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Symposium on Electrochemical Machining Technology 2022 (INSECT 2022)	6. 最初と最後の頁 171-178
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 柴田浩平, 陳俊達, 後藤昭弘	4. 巻 46
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 -加工阻害の要因調査-	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気加工技術	6. 最初と最後の頁 6-9
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 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 山口拓也, 陳俊達, 後藤昭弘, 白井康介	4. 巻 47
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 加工現象の調査	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気加工技術	6. 最初と最後の頁 5-6
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 後藤昭弘	4. 巻 65
2. 論文標題 難加工材の高度加工を実現する複合加工技術 電解現象を利用した超合金のミーリング加工	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 8-11
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 陳俊達, 後藤昭弘, 白井康介	4. 巻 36
2. 論文標題 電解現象を利用した超合金の高速ミーリング加工の研究 (第3報) -高速加工のための考察-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 24-25
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 36
2. 論文標題 電解現象を利用した超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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 陳俊達, 後藤昭弘, 白井康介
2. 発表標題 電解現象を利用した超合金のミーリング加工 -加工現象の調査-
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陳俊達, 後藤昭弘, 白井康介
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 - 高速加工のための考察 -
3. 学会等名 電気加工学会全国大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陳俊達, 柴田浩平, 白井康介, 後藤昭弘
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 大切込み加工の試み
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陳俊達, 後藤昭弘, 白井康介
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 -加工現象の調査-
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口拓也, 後藤昭弘, 白井康介
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 -工具目詰まり解消の試み-
3. 学会等名 電気加工学会全国大会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口拓也, 永野孝弘, 後藤昭弘
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 –工具目詰まり解消の試み–
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2024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