

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-

静岡理工科大学 ○陳俊達, 柴田浩平, 白井康介, 後藤昭弘

1. 緒言

本研究では、超硬合金の高速・高精度な加工方法として、電解現象を利用したミーリング加工の研究を行っている。Fig.1 に示すように、導電性の本体と絶縁性の切れ刃を持つ回転工具を使用して、超硬合金表面の Co を電解反応により溶出させ、Co が溶出して脆くなった部分を切れ刃により低負荷で除去加工しようとする方法である。この方法により切削抵抗を大幅に低減することができ、超硬合金の高速加工の可能性を示すことができた。

しかし、これまでの加工実験では、電解作用有り無しでの切削負荷の比較を行ったが、実際の加工量が小さく、高速加工と言えるような加工ではなかった。前回の報告²⁾では、超硬合金の高速加工を実現するための手法について検討した。そこで本報告では、前の研究を踏まえて、切込み量を大きくして電解の作用を大きくした場合の加工現象について調べた。

2. 高速加工に向けての方法

これまでの加工実験¹⁾では、φ10mm のダイヤモンド電着工具を用い、WC87%、Co13%の超硬合金を加工した。約13%のNaNO₃水溶液をクーラント兼電解液として吹きかけ、5Vの電圧を印加し、軸方向約4.3mm、半径方向約40μmの切込みを設定して加工した（装置の剛性が弱かったため、実際の半径方向切込み量は15μm程度であった）。加工時の平均の電解の電流値は約3Aであった。加工の際に流れた電荷がすべてCoのCo²⁺イオンとしての溶出に使われたと仮定すると、Coを除去することによる超硬合金の脆弱化の速度は約0.423[g/min]であった。この速度で超硬合金を除去しても、高速加工とは言い難い。一方、前回の報告²⁾で、Fig.2 に示すようなモデル（Fig.1 のように加工していると上から見た様子）を用いて、上記加工実験で流れた電解の電流値が妥当な値であるかを調べた。あらかじめ極間距離と流れる電流密度との関係を求めておき、加工中の極間距離を考慮し、どれだけの電流が流れるかを計算した。計算の結果は約2.5Aであり、おおよそ実際の電流値と合致した。すなわち、これまでのような数10μm程度の浅い切込みの状態では、加工の際に十分な量のCoを溶出させることは困難であり、本方法で高速加工を行うことは困難であることになる。

そこで、本研究の方法により超硬合金の高速加工を実現する条件について検討した。本方法はCoを溶出させた部分のみを除去するという前提であるので、加工速度を上げるためにはCoの溶出速度を上げる必要がある。電解の電流は、印加電圧、対向面積にほぼ比例し、極間距離にも大きな影響を受けることがわかっている。本報では、印加電圧は5Vに固定し、極間距離が狭い状態で、工具と工作物の対向面積を増やす方法、すなわち、切込みを大きくした重切削の方法を検討した。

前回の報告²⁾では、Fig.3 に示すように、切込みを大きくし、工具と工作物の対向面積を大きくすることで、電解の電流の値を大きくすることができることを示した。

本報告では、切込みを大きくして電解の電流を上げて加工を行う際に、実際どれくらいの速度で加工ができるかについて調べる。

3. 加工実験と結果

以上の考察に基づき、半径方向の切込み量を大きくして加工実験を行った。Fig.4 に実験に用いた装置の構成を示す。榎本工業株式会社製 CVN-300G をベースとした加工機を用いた。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。加工条件をTable 1 に示す。

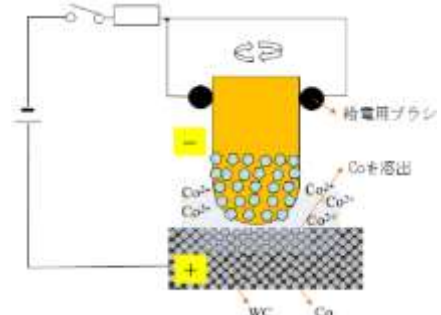


Fig.1 加工方法の概略

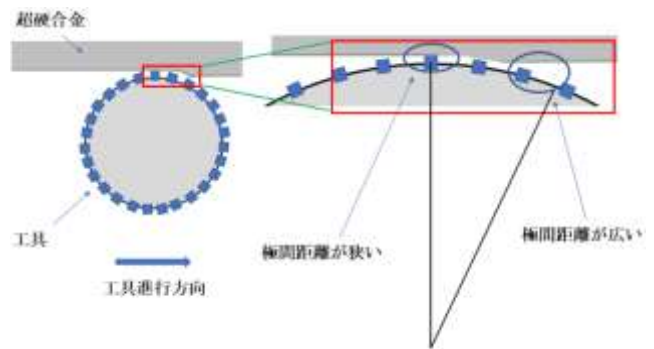


Fig.2 上から見た加工のイメージ（浅い切込みの場合）

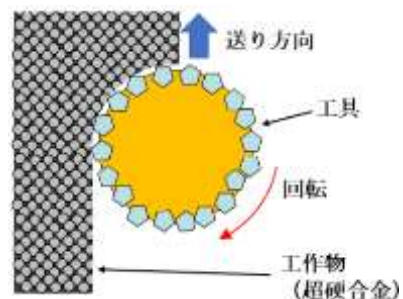


Fig.3 上から見た加工の様子（切込みを大きくした場合）

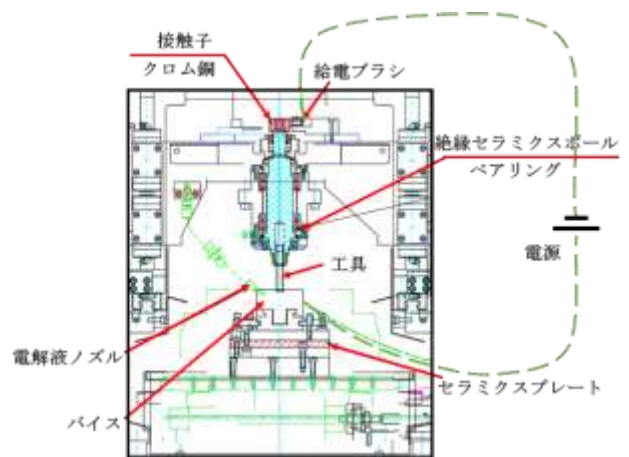


Fig.4 実験装置の構成図

Table 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	1.5mm/min~11mm/min
加工時間	各条件約1分程度
印加電圧	5V

今回の実験では、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値を調べた。各条件で 1 分間加工した。その結果を Fig.5 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 5mm/min 程度までは、送り速度が速くなると電解の電流値が高くなる傾向が見られた。工具送り速度が小さい場合に、電解の電流値が小さい理由は、以前の報告でも述べたように、電解作用により、超硬合金表面の Co が溶出した後に W の酸化が始まることによると考えられる。送り速度が小さい場合には、酸化した W を除去しきれない状態で加工が進み、電流値が低くなっていると考えられる。送り速度を大きくするに従い、酸化膜の除去が進み、電流値が大きくなっていくと考えられる。

工具送り速度が 5mm/min 程度以上になると、電解の電流値が 30~35A 程度に落ち着いていたことがわかる。この範囲の条件では、Co が溶出した部分を W の酸化がそれほど進んでいない状態で除去加工できていると推測できる。なお、工具送り速度が 6 mm/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 11 mm/min では短絡が発生した。放電や短絡の発生は、工具送り速度を上げることで追い込み気味の加工状態になり、導電性の切り屑（主に WC と考えられる）が工具の導電性の本体部分と工作物との間に入り込んだことが原因であると考えられる。

比較のため、電解無しの場合と同様の加工試験を行った。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、1.5 mm/min の送り速度の加工はできたが、2.0 mm/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、今回の条件では、電解を行うことで、電解無しの場合の 5 倍以上の速度で加工できたことになる。

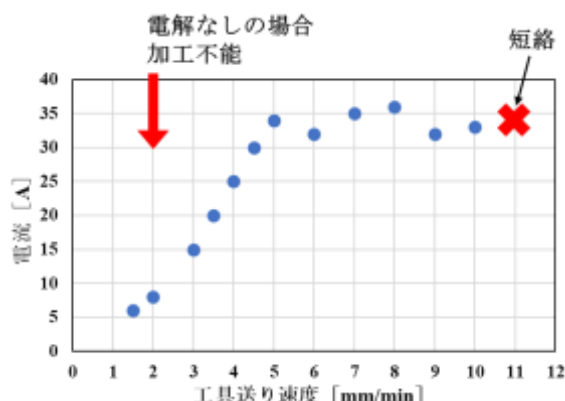


Fig.5 工具送り速度と電流値の関係

4. 加工速度についての考察

前章で実施した加工実験の結果を踏まえ、加工実験の各条件での加工の状態がどのようなものであったか考察する。

超硬合金表面の Co が溶出した部分を W の酸化がそれほど進んでいない状態で除去加工できていると考えられる場合に流れた電解の電流値を 30A とし、本方法によりどれくらいの速度での加工が可能であるか計算する。

電解電流が 30A の場合、加工中に流れる電荷量は、30[C/s]である。1分当たりの電荷量に換算すると、

$$30 \text{ [C/s]} \times 60 \text{ [s/min]} = 1800 \text{ [C/min]}$$

となる。電子のモル数にすると、

$$1800 \text{ [C/min]} / 96500 \text{ [C/mol]} = 1.8653 \times 10^{-2} \text{ [mol/min]}$$

となる。Coは2価で溶出するので、この電荷で溶出するCoのmol数は、

$$1.8653 \times 10^{-2} \text{ [mol/min]} / 2 = 9.3265 \times 10^{-3} \text{ [mol/min]}$$

である。このモル数のCoの重量は、

$$59 \text{ [g/mol]} \times 9.3265 \times 10^{-3} \text{ [mol/min]} = 0.550 \text{ [g/min]}$$

となる。工作物である超硬合金は、Co 13%であるので、Coが溶出する範囲の元の超硬合金の重量は、

$$0.550 \text{ [g/min]} / 13\% = 4.231 \text{ [g/min]}$$

となる。使用した超硬合金の密度は14.3 [g/cm³]なので、Coが溶出する超硬合金の体積は、

$$4.231 \text{ [g/min]} / 14.3 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0.296 \text{ [cm}^3\text{/min]} \\ = 296 \text{ [mm}^3\text{/min]}$$

となる。また、この加工方法は、工具の半径方向の切込みを5mmとし、軸方向には4mmとしたので、電解の電流が工具の送り方向の投影面にのみに流れて、Coの溶出のみに使われるとすると、工具の送り方向Coの溶出速度は、

$$296 \text{ [mm}^3\text{/min]} / (5\text{mm} \times 4\text{mm}) = 14.8 \text{ [mm/min]}$$

となる。実際には、電解の電流は加工した部分だけに流れたわけではなく、Coの溶出以外にも使われていると考えられるので、この速度よりは小さい値でしか送れないことになる。さらに、Coの溶出した範囲のみを除去できていたとしても、追い込み気味の加工では、加工屑が極間に大量に存在することになり、放電や短絡を起こしやすい状態になると想像できる。今回の加工実験では、計算で得られた14.8 [mm/min]よりも3割程度遅い10~11 [mm/min]程度の送り速度で短絡が発生した。今回の電解の条件（印加電圧5V、電解の電流値30A程度）で、さらに加工速度を上げるためには、加工部分以外にできるだけ電流がながれないようにすること、短絡を防ぐために加工屑を極間から速やかに除去する方策を採ることなどが考えられる。

今回の実験では、印加電圧が5Vと低いにもかかわらず、約3 [g/min]の速度で加工ができた。電圧の条件を見直し、切込み量を変えることで、更に高速な加工を目指していく。

5. 結論

電解現象を利用した超硬合金のミーリング加工において、電解による Co の溶出速度を上げるため、工具の軸方向、半径方向の切込み量を大きくし、加工中の工具と工作物の間の極間距離が小さい状態で対向面積を大きくして加工実験を行い、以下の結論を得た。

- ・印加電圧 5V、半径方向切込み 5mm、軸方向の切込みで加工したところ、30A の電解電流を流すことができた。
- ・30A の電解電流が流れる場合、電荷がすべて Co の溶出に使われると仮定すると、計算上、本方法では 4 [g/min] を超える加工速度で加工できることになるが、実際にはその前で短絡が発生した。
- ・今回の実験では、印加電圧が 5V と低い条件であったが、約 3 [g/min] までの加工ができた。電解を用いない場合には、電解を用いた場合の 1/5 以下の速度で加工不能になった。

謝辞

本研究の一部は、公益社団法人大澤科学技術振興財団研究助成一般研究開発によって実施されました。ここに記して深く感謝いたします。

本研究の実験装置の立ち上げに協力して下さった榎本工業株式会社 川村健広氏に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、実験装置について、数々のご教示をいただきました株式会社牧野フライス製作所 栗原治弥氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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: 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―, 電気加工学会誌, Vol.52, No.35, (2020)22-30
- 2) 陳俊達, 後藤昭弘, 白井康介: 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―, 電気加工学会全国大会2021講演論文集, (2021)13-16