

## パラレルメカニズムを用いたNC電解加工の高精度化

金沢大学 ○野竹 俊太, ◎小谷野 智広

### 要旨

NC電解加工は、工具電極を陰極、工作物を陽極として、工具電極を数値制御して走査させることで、工作物を溶出させる電解反応を利用した加工法である。しかし、電極を走査した際に加減速による滞在時間の増加の影響により加工深さが増大してしまうという問題がある。そこで本研究では、電極の送り速度に応じた印加電圧制御法を新たに開発し、この問題を解決した。

### 1. 緒言

電解加工<sup>1)</sup>は、工具電極を陰極、工作物を陽極として電解液中で電圧を印加し、工作物を溶出させる、電解反応を利用した加工法である。電解加工は工具電極が消耗しないことや、加工変質層が生じないといった特徴を持つ。一方で加工形状に合わせて専用の工具を作成する必要があることが課題となっている。一方、NC電解加工<sup>2)</sup>は、単純形状の工具電極を数値制御して走査させることで、電極通過部を局部的に加工していき3次元形状に加工する方法である。本方法では、加工形状に合わせた電極を加工形状ごとに作成する必要がない。従って、電極作成に費やすコストや時間を減らすことができる。このNC電解加工においては、工具電極を高速で走査すると表面粗さが良好になることが知られている<sup>3,4)</sup>。

しかし、電極を高速で走査した際に場合、工具経路によっては加減速を伴うため、これによる滞在時間の増加の影響により、局部的に加工深さが増加してしまうという問題がある。そこで本研究では、電極の送り速度に応じた印加電圧制御を行うことで、この問題を改善し、加工精度を向上させることを目的とする。

### 2. 実験装置

#### 2.1 パラレルメカニズム

本研究では、3自由度パラレルメカニズムを用いた電解加工機を使用している。図1にその概要を示す。本装置は、3つの直動機構(リニアモータ)を等角度(120°)で水平に配置している。直動機構には、リニアモータの一種であるシャフトモータ(ジイェムシーヒルズトン, GHR15, ストローク300mm)を用いている。直動機構とエンドエフェクタを繋ぐリンクには長さの等しい6本のロッドが用いられ、各直動機構とエンドエフェクタが高精度球面軸受(ヒーハイスト株式会社, SRJ006C)を介して、平行な2本のロッドで接続されている。また、このエンドエフェクタに工具電極を固定し、工具を走査することで加工を行う。工具電極には直径3mm、内径0.75mmの中空黄銅パイプを用いる。実験方法の概要を図2に示す。工作物には炭素鋼(S50C)を用いた。電解液には中性の20wt%のNaNO<sub>3</sub>水溶液を使用し、ポンプで工具電極の中心穴から電解液を極間へ供給する。なお、電極側面での加工を防ぐために電極側面を絶縁用の

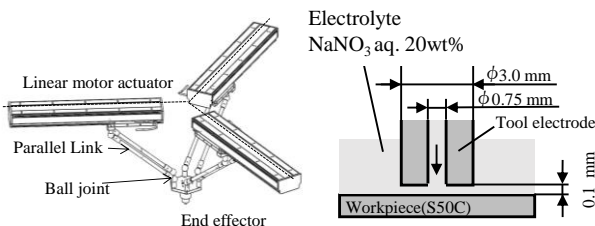


Fig. 1 3 DOF parallel mechanism Fig. 2 Experimental setup

塗料によって電気的に絶縁した。また、補助的なノズルから工作物上面に電解液を供給し、工作物と工具電極が電解液に浸漬された状態で加工を行った。

#### 2.2 エンドエフェクタの速度

エンドエフェクタの速度が実際にどのように変化するか、測定を行った。図3にエンドエフェクタを速度100mm/sで往復運動させた場合の運動方向が切り替わる点での速度を示す。100mm/sから減速して停止し、反対方向に加速して-100mm/sに達している。この減速と加速にあわせて50msほどの時間を要しており、このような低速領域が加工形状に影響を与えている。

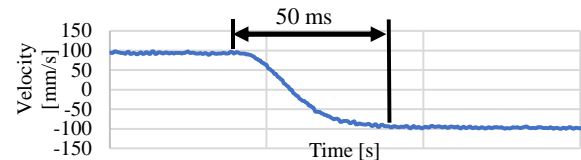


Fig.3 Velocity of end effector

#### 2.3 速度に応じた印加電圧制御の原理

走査加工において、あるx座標における除去形状 $h(x)$ は単位除去形状を $f(x)$ 、速度分布を $V(x)$ とおくと、(1)式のように畳み込み積分の形で求めることができる<sup>5)</sup>。

$$h(x) = \int f(x-u) \frac{du}{V(u)} \quad (1)$$

式(1)から分かるように、除去形状、つまり加工深さは速度に反比例する。従って、加減速により速度が遅くなる場所では、加工深さが増加してしまう。そこで、工具、工作物間に印加する電圧を制御することでこの問題を解決する。

図4に電圧制御の原理を示す。図4(a)は電圧制御を行わなかった場合を表しており、速度が遅い点でも一定の大きさで電圧を印加しているため、局部的に加工深さが増加してしまう。そこで、図4(b)のように速度が遅い点では一定周期のパルス電圧を印加し、速度に比例して電圧の印加時間を短くする。これにより、加工面のどの地点でも電圧の総印加時間を

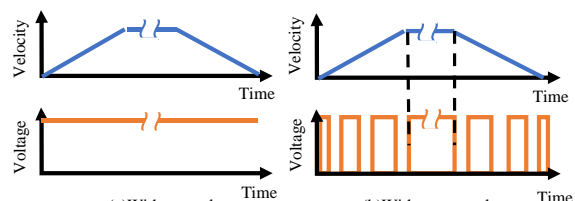


Fig.4 Principle of applied voltage control

おおよそ等しくすることで、加工精度の向上を図った。

### 3. 加工形状シミュレーション

前節で述べた印加電圧制御の原理が正しいことを確認するために、(1)式を用いて加工形状のシミュレーションを行った。まず、加工形状のシミュレーションに必要な単位除去形状と速度分布を実験によって測定した。単位除去形状には極間距離  $100\mu\text{m}$ 、印加電圧  $10\text{V}$ 、電圧の印加時間  $1\text{s}$  で電極を移動させずに加工したものを使用した。電極の速度分布は、電極の送り速度を  $100\text{mm/s}$  とし、移動経路は原点から  $x$  方向に  $+10\text{mm}$  移動したのち、 $x$  方向に  $-20\text{mm}$  移動し、そこから  $x$  方向に  $+10\text{mm}$  移動することで原点に戻るという動作を  $10$  回繰り返した。図 5、図 6 は単位除去形状と速度分布である。これらを用い、電圧制御の有無による加工形状のシミュレーションを行った。

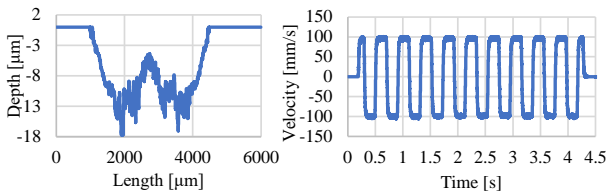


Fig.5 Unit removal shape

Fig.6 Velocity distribution

シミュレーションの結果を図 7 に示す。青線は電圧制御を行わない場合、緑線は加減速なく常に  $100\text{mm/s}$  で加工できているとした理想的な場合、灰色線は加減速時のパルス電圧の周期を  $3\text{ms}$  として電圧制御を行った場合の加工溝の断面形状である。また、図 8 に溝の端部分を拡大したものを示す。この結果から電圧制御を行わなかった場合に見られた局所的に加工深さが増加してしまうという現象が、速度に応じた印加電圧の制御を行うことで改善されるという結果が得られた。また、制御を行うと、加減速がない理想的な場合とほぼ形状が一致している。

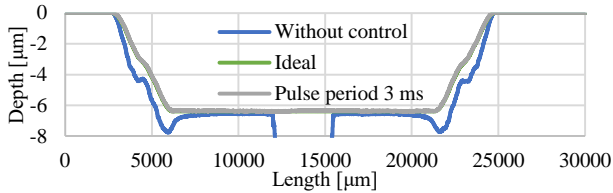


Fig.7 Simulation results of groove profiles

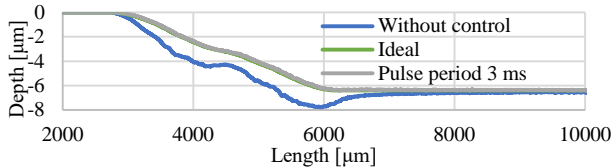


Fig.8 Enlarged view of groove end

## 5. 速度に応じた印加電圧制御を用いた溝加工

### 5.1 速度に応じた印加電圧制御の方法

実際に速度に応じて印加電圧を制御した溝加工を行った。電圧制御を行うために、リアモータドライバから出力される各リアモータの位置座標と速度座標に応じた電圧をマイコンに取り込み、エンドエフェクタの速度をリアルタイムで計算する。印加する電圧の制御方法は、PWM 制御と同様であり、周期を  $3\text{ms}$  固定とし、 $3\text{ms}$  に一回エンドエフェクタの速度に応じて ON 時間のパルス幅を  $0\sim 3\text{ms}$  の間で変化させている。実際に加工を行った場合の、加速時のエンドエフェクタの速度と極間に印加される電圧をオシロスコープで測定したグラフを図 8 に示す。緑線が

エンドエフェクタの速度を、黄色線が電極に印加される電圧を表している。このようにエンドエフェクタの速度が遅い場所、すなわち滞在時間の長い場所では電圧の印加時間を短くすることで、加工面の電圧の印加時間をおおよそ一定にすることができる。

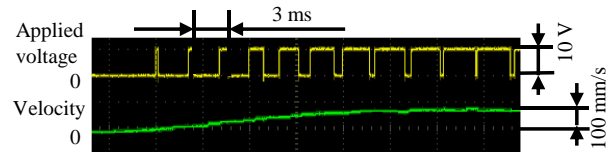


Fig.8 Waveform of velocity and applied voltage

### 5.2 実験方法

実際に電圧を制御した電解加工実験を行った。電解液の供給圧力  $0.36\text{MPa}$ 、印加電圧の大きさ  $10\text{V}$ 、極間距離  $100\mu\text{m}$ 、電極の送り速度は最高速度  $100\text{mm/s}$  としている。電極の移動経路は原点から  $x$  方向に  $+10\text{mm}$  移動したのち、 $x$  方向に  $-20\text{mm}$  移動し、そこから  $x$  方向に  $+10\text{mm}$  移動することで原点に戻るという動作を  $10$  回繰り返して溝加工した。

### 5.3 実験結果

図 9 に電圧制御を行わない場合と電圧制御を行った溝の長手方向の断面形状を示す。なお、電圧制御を行わない場合では直流電源で加工しているため、電源の ON/OFF を手作業で行っている影響で中心が深くなってしまっている。電圧制御を行わない場合の加工では運動の方向が切り替わる溝の端部において加工深さが深くなっている。また、局所的に加工深さが深くなりくぼみが発生している。一方で、電圧制御を行った場合の加工では、これらが生じることなく加工面が平滑であった。これらのことから、速度に応じた電圧制御を行うことにより加工精度を改善することができた。

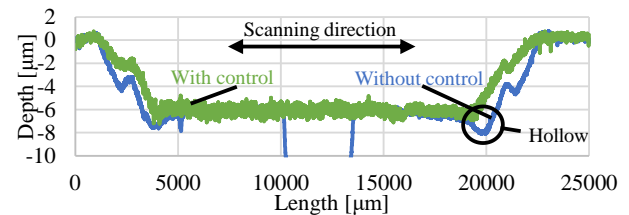


Fig.9 Machined grooves

## 5. 結言

電極を高速で走査させる NC 電解加工において、電極の送り速度に応じた電圧制御を行う方法を開発した。その結果、加減速が生じる点において加工深さが増加するという問題を解決でき、加工精度を改善できた。

### 参考文献

- 1) 佐藤敏一, 電解加工と化学加工, 朝倉書店, 1970
- 2) K. P. Rajurkar, D. Zhu, J. A. McGeough, J. Kozak, A. De Silva, New Developments in Electro-Chemical Machining, Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 2, 1999, pp. 567-579.
- 3) T. Kawanaka, M. Kumieda, Mirror-like finishing by electrolyte jet machining, Annals of the CIRP, Vol. 64, No. 1, 2015, pp. 237-240
- 4) 小谷野ら, 高速パラレルメカニズムを用いた NC 電解加工, 電気加工学会全国大会(2020)講演論文集, 2020, pp. 73-76
- 5) 根岸ら, 非球面光学素子の超平滑研磨技術に関する研究(第 2 報)-修正研磨における滞留時間の計算方法, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 3, 1996, pp. 408-421.