

ワイヤ放電加工のフラッシング最適化による金型高精度加工の実現

岡山大学大学院自然科学研究科

教授 岡田 晃

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014010)

キーワード：ワイヤ放電加工，CFD，フラッシング

1. 研究の目的と背景

ワイヤ放電加工は高硬度難削材の加工を得意とする加工法であり、パンチやダイ、押し型など種々の金型の精密加工に多用される。近年、工業製品の小型化・軽量化に伴い、ワイヤ放電加工においても、高精度加工の需要が高まっている。ワイヤ放電加工では放電ギャップが数ミクロン、あるいはそれ以下となるため、加工粉を如何に効率よく排出するかが高精度な加工を実現する上で重要である。極間での加工粉滞留が起こると、放電集中を生じ、形状精度の悪化やワイヤ断線を引き起こす¹⁾。従来、加工粉排出は上下のワイヤガイド部分からの加工液噴出（フラッシング）によって行なわれているが、加工中の加工粉の挙動はまったく不明であり、従来のフラッシング方法が極間の加工粉排出にどれほどの効果を持つかも詳細には分かっていない。従って、安定した放電加工状態のためには、上下ノズルからの噴射の流量や時間的変化、ジェット形状等のフラッシング方法に大いに改善の余地がある²⁾。

そこで本研究では、CFD 解析を活用しノズルからの噴出流量、上下ノズルから流量の組み合わせ、ノズルと工作物の距離、時間的に流量を変化させる脈動、さらにはノズル噴射口の形状、ノズル噴射角度などを変化させて極間の加工液流れ、加工粉排出挙動に及ぼす影響を明らかにし、効率的に加工粉排出を行なう最適フラッシング方法について検討を行った。さらにフラッシングが加工中のワイヤ撓みに及ぼす影響についても CFD 解析によって得られたワイヤ表面での圧力分布を利用してワイヤの構造解析を行うことによって考察した。

2. CFD 解析モデル

CFD 解析には市販のソフト（CDAJ 社製 STAR-CD Ver.4.06）を用い、非定常非圧縮乱流三次元モデルの有限体積法による解析^{4),5)}を行った。図 1 に示すような形状の解析モデルを作成した。解析モデルのコの字状の部分は加工溝外側の解析範囲を示しており、図に示すような範囲の流れを解析する。1st カットを想定し、厚さ 10mm の工作物を端面から 10mm 加工した状態の加工溝としている。詳細を表 1 に示す。境界条件については、工作物およびワイヤ電極表面ではすべりを 0 とし、また、 $\phi 200\mu\text{m}$ のワイヤ電極表面では垂直方向下向きに速度を与えて、ワイヤ走行

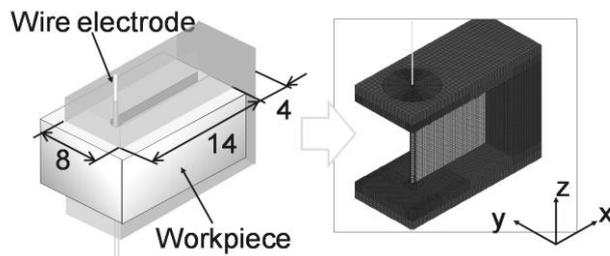


図 1 CFD 解析モデル

表 1 CFD 解析条件

Workpiece thickness	10.0mm
Machining length	10.0mm
Side gap	0.125mm
Wire diameter	0.2mm
Nozzle stand-off distance	2.0mm
Kerf width	0.45mm
Wire running speed	10.0m/min
Fluid's density	$9.976 \times 10^2 \text{kg/m}^3$
Viscosity	$8.887 \times 10^{-4} \text{Pa}\cdot\text{s}$

を再現させた。そのほかの解析境界は圧力境界としている。ワイヤ走行速度が加工液流れに及ぼす影響を精度よく解析するため、ワイヤ近傍では、セルサイズを密に配置している。なお、放電時の放電爆発力や静電気力、それに伴うワイヤ振動は考慮していない。なお、解析の精度については、加工溝高速度観察モデルを用いた溝内流れの PIV 解析結果との比較により定量的に十分な精度を有することをこれまでに検証している³⁾。

3. 従来フラッシングにおける加工溝内の流れ場 3・1 ノズル噴射流量の影響

従来のノズルフラッシングにおけるノズル噴射条件が加工溝内の加工液流れに及ぼす影響を検討した。表 2 に示すように、上下ノズルと工作物との距離を 2.0mm、ノズル直径を 6.0mm に固定し、ノズル噴射流量を 1.0, 3.0, および 6.0L/min と変化させ、それらが加工溝内の流れにどの

表2 フラッシング条件

Flow rate (L/min)	Upper F_u	0, 3.0, 6.0
	Lower F_l	
Nozzle diameter D_n (mm)		3.0, 6.0

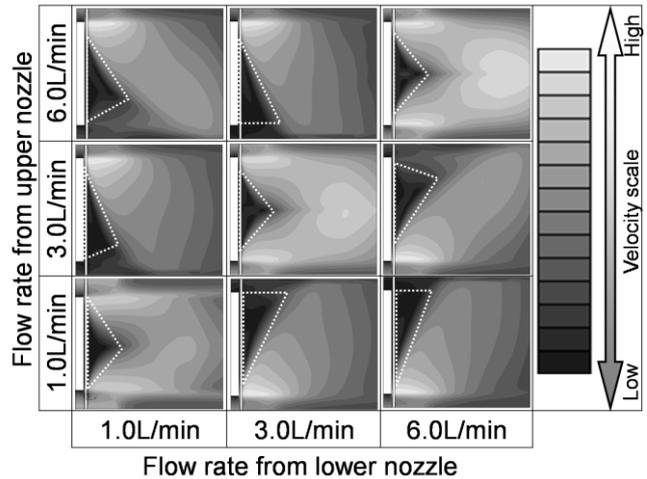
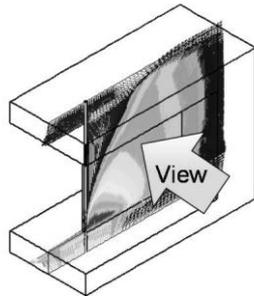


図2 ノズル噴射流量による加工溝内流れ場の違い

ような影響を及ぼすかを検討した。なお、これ以降に示す解析結果は、加工溝中心部を通った縦断面を矢印の方向から見たもので比較を行った。

解析結果を図2に示す。濃淡によって速度分布を示している。解析結果から明らかなように、上下ノズル噴射をどのように与えてもワイヤ付近の加工溝中央部では、ノズル噴射で生じた加工溝上部からの流れと下部からの流れが衝突し、流速がほぼ0となる領域が発生することが確認される。すなわち、この範囲では加工液の排出が効率よく行なわれていないことが推測される。いずれの噴射条件においても、これらの範囲には加工粉が発生する放電発生域の大半が含まれており、従来の工作物上下からのノズル噴射が必ずしも加工溝内の加工粉の排出に有効であるとは限らないことがわかる。

3・2 CFD 解析結果と実際の加工面との比較

上記の解析結果、および加工溝内の速度分布が実際の加工面にどう影響を及ぼすのかを検証するため、加工条件をCFD解析条件と同様にして、15mmほど荒加工した場合の加工面と比較した。その結果を図3に示す。実加工面においては黒ずんだ模様がいずれのノズル噴出条件において

も形成されており、加工粉の滞留領域と加工粉濃度の高い流れが反映されていると考えられる。そしてCFD解析で確認された速度が減少する領域と、これらの黒ずんだ模様の領域は、ほぼ一致していることが分かる。すなわち、CFD解析によってワイヤ放電加工溝内の流れを十分に再現できることが確認された。

3・3 ノズル距離とノズル径の影響

次に上下ノズル間距離を0.1, 0.5, および2.0mmと変化させ、このノズル間距離が及ぼす加工溝内の流れについて検証した。解析結果を図4に示す。図よりわかるように、上下ノズル間距離を変更した場合、溝内部の最大速度については大きく変化しており、当然のことながらギャップ間距離が小さいほうが溝内の流れの最大速度は大きくなる。しかしながら、加工液の速度がほぼ0となる領域は、ノズル間距離を変化させてもほとんど同じである。また、ノズル径 D_n を変化させた場合には、噴射ノズルの径を小さくすることで、加工溝内で構成される加工液の流れ場の速度は大きく上昇するが、加工液流れの速度が著しく減少する滞留領域がやはり存在し、ノズル径はその領域の大小にはそれほど影響を与えてないことを確認している。

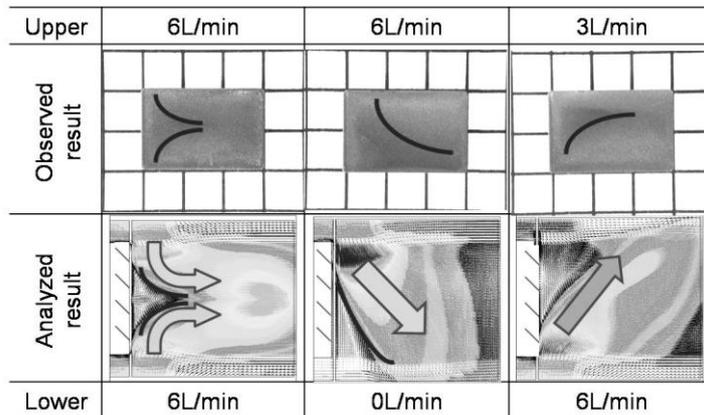


図3 加工面の光学観察結果と流れ場解析結果の比較

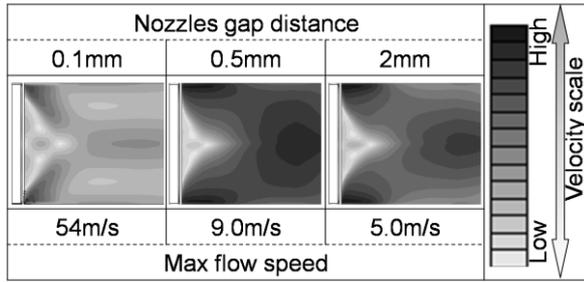


図4 ノズル距離の影響

4. 新しいフラッシング法の提案

ノズル径やノズル間距離は、加工溝内の流れ場を形成する速度に大きな影響を及ぼすものの、ワイヤ付近の滞留領域

域にはあまり影響を与えないことが分かった。そこで、滞留領域の減少を目的としてノズル噴射に傾斜を付与した場合の効果について試みた。

図5に従来のノズルと傾斜ノズルの写真、立体図、および断面図を示す。写真ではノズル噴射口を黄線で示しており、立体図では加工液が流れる領域を濃いグレーで示している。これまでの検討で工作物厚さによる溝内の加工液流れや加工粉挙動が異なることが明らかになっている。このことから工作物厚さにより最適なノズル噴射方法は異なる可能性がある。工作物厚さごとの影響も検討するために、 $T_w=10, 50\text{mm}$ の二通り行った。

図6に通常ノズルと傾斜ノズルを使用して、厚さ10mmの工作物を加工した場合の解析結果と放電加工面の比較を示す。解析結果より、通常ノズルに比べて前方傾斜ノズ

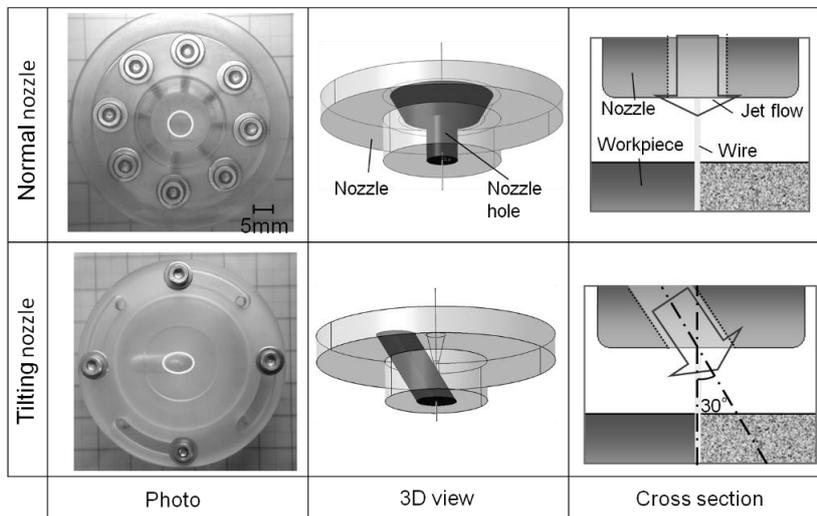


図5 従来ノズルと傾斜ノズルの光学写真、3次元図、および断面図

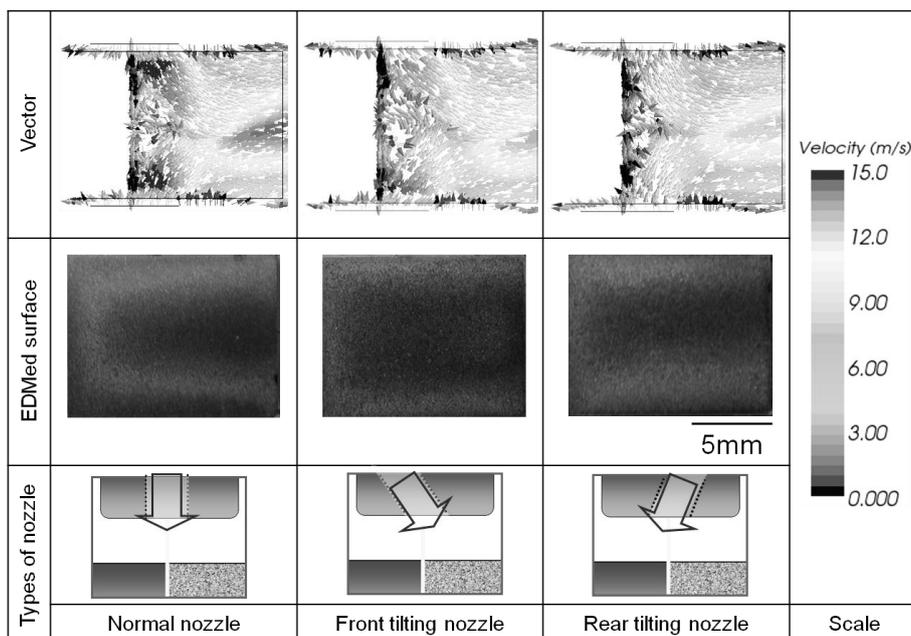


図6 各ノズルを用いた場合の加工溝内流れ場と加工面光学観察結果の比較

ルは渦流れの発生領域が増加しており、逆に後方傾斜ノズルは減少していることがわかる。また放電加工面では、中央に黒い加工粉の滞留後が見られ、前方傾斜ノズルの場合はこれが上下に広がっている。これは渦流れ発生領域が増加した解析結果と傾向が一致する。このことよりノズル噴射に傾斜を与えることによって、実際の加工でも渦の発生領域が変化していることが明らかとなった。

図7に加工速度の変化を示す。いずれのノズルの場合も放電電流値の増加とともに加工速度は増加する。そして加工速度を比較すると、通常ノズルと後方傾斜ノズルがほぼ同じ加工速度で、前方傾斜ノズルがこの二つの噴射方法に比べ3~4%程度低くなっている。一方、加工粉排出の観点からは、通常ノズルが27Aより大きい電流値ではワイヤ断線が生じ加工が不可能であったが、前方傾斜ノズル、後方傾斜ノズルを使用した場合 $I_p=30A$ まで加工を行うことができた。前方傾斜ノズルの場合渦流れ領域が増加することによって加工粉が滞留する領域が広がりその領域内の加工粉濃度はかえって低下するためと考えられる。また、後方傾斜の場合では加工粉が一か所に集中することでワイヤ断線が起りやすくなるのではと考えていたが、こちらも $I_p=30A$ まで加工することができた。これは実際の加工では渦流れ領域が減少することで加工粉排出は効果的に行えていることを示している。

以上のように、傾斜ノズルではより大きな放電電流値でもワイヤ断線が生じないことから、結果的に通常ノズルに対して後方傾斜ノズルの場合3%程度高い加工速度で加工できることが明らかとなった。

5. フラッシングに起因するワイヤたわみの解析

ノズルフラッシングでワイヤ表面に作用する流体力に起因するワイヤの撓みについて構造解析を利用して数値解析的に検討を行った。

図8に工作物上端付近のワイヤ表面上での応力分布を示す。ワイヤの進行方向に対して前方、側方、および後方からの解析結果を示している。図より、工作物上端部においては、ワイヤ背面と比較するとワイヤ前面の方がワイヤ表面に作用する圧力が高くなっていることが確認できる。このことから、工作物上端付近においてノズルによる加工液噴射によって、ワイヤは後方に力を受けていると推測できる。なお、工作物下端においても同様の応力分布を示していた。また、ワイヤ表面に作用するせん断応力分布についても解析したところ、同様に工作物上下端部で高い値を示したが、圧力と比較してかなり小さい値となった。

ノズル噴射によるワイヤ周りの応力分布により、ワイヤは加工方向後方に撓むと予測される。そこで、CFD解析で得られたワイヤ表面の応力分布をモデル表面に与えて構造解析を行うことでワイヤの変位を解析した。ワイヤ材質は黄銅とし、モデル上下端ではXY方向の変位を拘束している。また両端においてZ方向に任意の引っ張り荷重を与えることでワイヤテンション負荷を再現している。

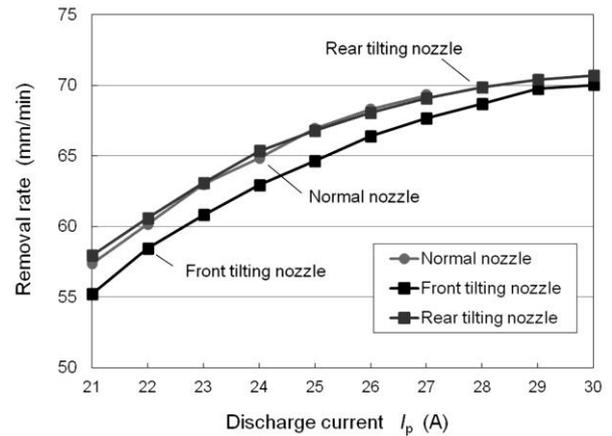


図7 各ノズルによる加工速度の違い

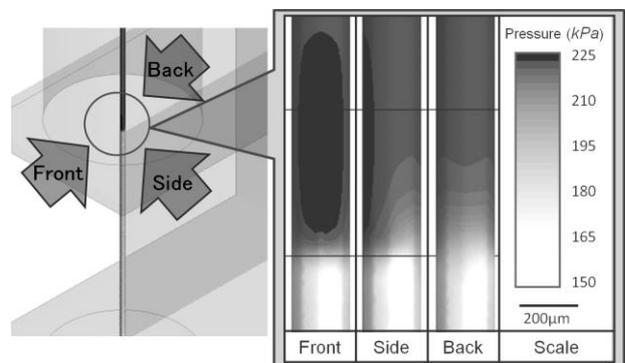


図8 工作物上面付近のワイヤ表面に作用する圧力分布解析結果

表3 構造解析条件

Wire	Brass	Steel	Tungsten
Young's modulus	106GPa	206GPa	350GPa
Poisson ratio	0.35	0.3	0.17
Density	8.4g/cm ³	7.85g/cm ³	19.3g/cm ³
Diameter	0.2mm		
Length	27mm($D_s=0.5mm$)		
Wire tension	12N		

表2に詳細な構造解析条件を示す。ワイヤ材質による撓みの比較をするため、黄銅に加えて、一般的にワイヤの芯線として用いられる高張力鋼およびタングステンの物性値も示している。

図9に工作物とノズル先端間の距離であるノズル噴射距離 D_s を変化させたときのワイヤ変位の解析結果を示す。ワイヤの進行方向は左向きとなっているがどの場合も進行方向後方にワイヤは撓み、ワイヤ中央部で最大の変位を示している。そして、その変位量はノズル噴射距離 D_s が小さいほど大きくなる。さらに図10に各ワイヤ材質について噴射流量を変化させたときのワイヤ撓み量を示す。ワイヤの剛性が大きいほどワイヤ変位は当然小さくなるが、黄銅ワイヤの場合その撓みは著しく大きい。また、いずれ

のワイヤ材料についても噴射流量の増加にともなってワイヤ撓みも大きくなる。以上の結果から、ノズルからの加工液噴流によるワイヤの撓みを考慮した場合、ノズル噴射距離が小さい場合やノズル噴射流量が多い場合にはワイヤ変位を顕著に増大させるため、加工粉排出効果を維持しながら最適な条件を選定する必要があると考えられる。

6. まとめ

- (1) 従来の工作物上下からのノズル噴射では、加工溝内のワイヤ付近に流れの滞留が発生し、必ずしも加工溝内の加工粉の排出に有効であるとは限らない。
- (2) ノズル噴射距離を小さくすると溝内の加工液の速度は増加するが、滞留領域の大きさ、位置は変化しない。
- (3) ノズル噴射を傾けることによって加工粉の滞留領域を変化させることができる。また、それにより加工速度が増加する。
- (4) ノズル噴射によって工作物上下面付近ではワイヤ前面の方がワイヤ背面より表面に作用する圧力が高い。これにより、ワイヤは工作物上下面付近の位置において集中して加工方向後方に力を受ける。
- (5) ワイヤの撓み量はノズル噴射距離の減少、および噴射流量の増加とともに2次関数的に増加する。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団一般研究開発助成 (AF-2014010) のもとで行われました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) H. Obara, et al.: Control of Wire Breakage during Wire EDM. International Journal of Electrical Machining, No.4 (1999) pp. 53-58.
- 2) T. Masuzawa, et al.: Improved Jet Flushing for EDM. Annals of the CIRP, Vol.41, No.1 (1992) pp. 239- 242.

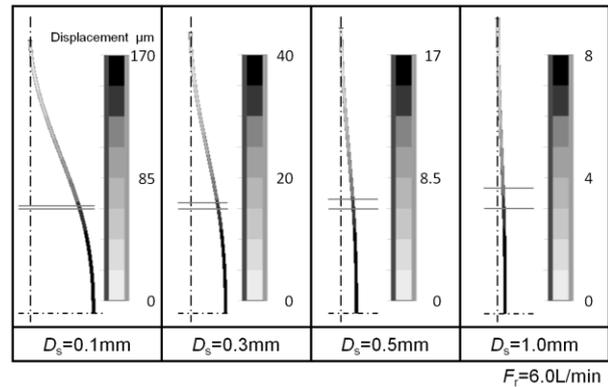


図9 ワイヤ撓み解析結果

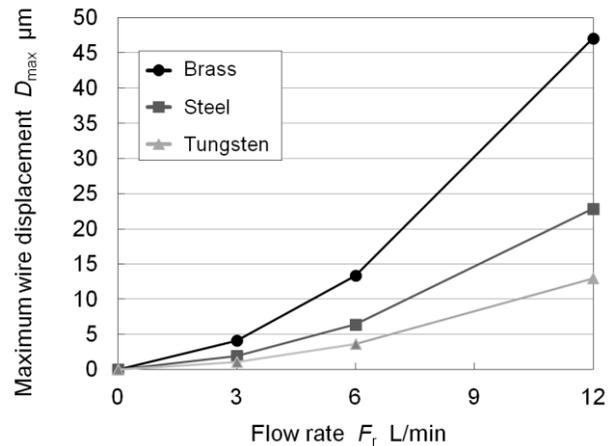


図10 各ワイヤ材質におけるワイヤ撓みとノズル噴射流量の関係

- 3) A. OKADA, et al.: Computational Fluid Dynamics Analysis of Working Fluid Flow and Debris Movement in Wire EDMed Kerf, CIRP Annals, Vol.58, No.1 (2009) 209-212.
- 4) D.C. Wilcox: Turbulence Modeling for CFD 2nd ed., DCW Industries, La Canada, (2002).
- 5) 標 宣男ら: 数値流体力学, 朝倉書店, (1998) pp.15-43.