

1. はじめに

近年、複雑形状加工の需要増加にともない工作物板厚が途中で変化するワイヤ放電加工も多くなっており、この場合工作物上下面に対しノズルが離れた状態のノズル両浮き加工やノズル片浮き加工を行うことになる。両浮き加工や片浮き加工では段差付近でのワイヤ断線が頻発することが知られており、実際の生産現場において問題視されている。

ワイヤ断線の対策として、加工条件や噴射流量の調節によって断線を低減する方法が従来実用されている。板厚一定時の加工におけるワイヤ断線は極間での加工粉滞留とそれに起因する放電集中により起こるため、ノズルを用いた鉛直方向への加工液の噴射で加工粉排出を促しているが、過度のノズル噴射はワイヤ撓みを助長する。さらに段差加工時の加工液流れや加工粉排出状況は全く明らかとなっていない。

2. 目的

このようなワイヤ放電加工における段差加工需要の増加、およびその場合のワイヤ断線頻発を含めた加工特性の悪化の課題に対し、本研究では、工作物厚さが増加する段差加工時におけるワイヤの断線頻度分布や加工特性を明らかにするとともに、加工液流れ場や加工粉排出時間、ノズル噴射に起因するワイヤ撓みとの関係について CFD 解析を活用して検討を行った。さらに、ワイヤ断線を低減できる最適な噴射流量条件の検討も行った。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

ワイヤ放電加工は、ダイやパンチなどの型の製作や機械加工技術では困難な高硬度難削材の複雑形状加工に広く利用されている。このように、加工高精度化を担う重要な加工法の一つであり、その加工性能向上は金型製作をはじめ、各部品の性能向上に大いに貢献できる。従って、本研究の成果はまず、ワイヤ放電加工を利用するモノづくり企業に広く大きなメリットをもたらす。

一方、放電加工機メーカーにおいて加工機制御技術の高精度化や精密加工のための加工条件の最適化が図られ、ワイヤ放電加工技術の高性能化が進展してきたが、加工液フラッシング方法の最適化という新しい観点からの加工性能向上が実現されれば、放電加工技術において大きなブレークスルーをもたらすことが期待できる。そして本研究がさらに進展すれば、それらの成果は特に放電加工機メーカーとの共同研究につながるものであり、成果の応用と実用化が大いに期待できる。

4. 研究内容の詳細

4.1 工作物板厚変化時の加工特性変化

はじめに、段差を有する工作物のワイヤ放電加工時にどの位置でワイヤ断線が頻発するかを調べるためにワイヤの断線頻度実験を行った。工作物厚さが 10mm から 20mm に変化する段差形状の合金工具鋼 SKD11 に対し、直径 200 μ m の黄銅ワイヤを用いて上側ノズル片浮き加工を行った。電気条件は板厚が 10mm、および 20mm のそれぞれの場合における加工機メーカー推奨加工条件に準じた条件を用い、噴射口直径 6.0mm の上下ノズルからの加工液噴射流量をそれぞれ 6.0L/min とし、加工を行った。

図 1 に段差からの距離 D_S におけるワイヤの断線頻度を示す。なお、段差からの距離 D_S は点線で示す段差位置からワイヤまでの距離とし、段差前を負、段差後を正の値と定義する。図より、いずれの加工条件の場合でも加工面積が急激に増加する段差位置や段差後では実際にはワイヤ断線は全く起こらず、段差の少し手前でワイヤ断線が頻繁に生じることが分かる。今回の工作物形状の場合、 $D_S = -4 \sim -2$ mm 付近でワイヤ断線が頻発することが確認できる。

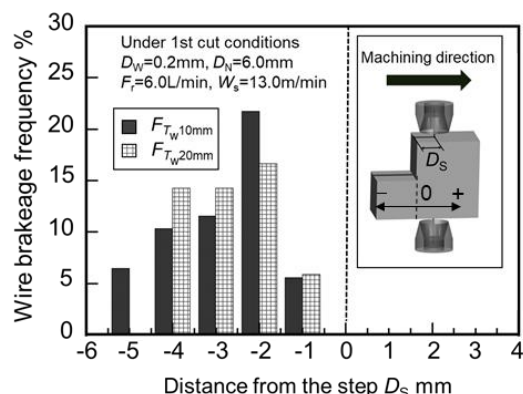


図 1 段差からの距離 D_S によるワイヤ断線頻度分布

次に、段差前における加工速度および加工溝幅の変化を測定した。加工条件は板厚が 10mm の場合の断線頻度実験で使用した条件を用いた。図 2 に段差からの距離 D_S における加工速度および加工溝幅の測定結果を示す。図の加工溝幅は加工溝の上部、中央部および下部で測定した平均値としている。図より、加工溝幅は $D_S = -3$ mm で最も大きくなり、加工速度は $D_S = -4 \sim -2$ mm で低下していることが確認できる。これらのことから、 $D_S = -3$ mm 付近ではワイヤ断線頻度の増加だけでなく加工特性の低下も生じることが分かった。

4.2 CFD 解析による加工液流れ場解析

工作物の板厚が増加する場合の CFD 解析モデルを図 3 に示す。数値流体解析には市販の流体解析ソフト(STAR-CCM+ Ver.12.04)を用いており、定常/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を行った。このモデルは、段差前は上側ノズル片浮き加工、段差後では上下ノズル密着加工を想定しており、ノズル密着状態ではノズル噴射距離を 0.5mm としている。境界条件は、工作物、およびノズル内面をすべり 0 の壁面境界、ノズル上下端を加工液の流入境界、その他の境界は圧力境界としている。加工液はワイヤ放電加工で広く用いられる脱イオン水とし、ノズル先端から工作物に向けて任意の流量で噴射される。

図 4 に $D_s = -3 \sim 0\text{mm}$ の加工溝中央縦断面における加工液の流れ場、および圧力場の解析結果を示す。流れ場は三角の向きが流れの方向を、その濃淡が大きさを表し、圧力場は濃淡で圧力の高さを表す。なお、 $D_s = -3 \sim -1\text{mm}$ の範囲では流れが非定常であったため、最も変動している時刻での結果を示す。流れ場の解析結果より、 $D_s = -3\text{mm}$ では加工上端部の加工液流れがワイヤを加工方向後方に押す向きであるのに対し、 $D_s = -2\text{mm}$ ではその向きが加工進行方向に遷移していることが確認できる。これは、 $D_s = -3\text{mm}$ では上側ノズルから段差の縦壁に沿って垂直に加工液が流入し、その後開放空間の後方に向かう流れ場が形成されるのに対し、 $D_s = -2\text{mm}$ では上側ノズルからの噴流が工作物上端面とすぐに衝突することで加工液が後方に傾斜して流入し、その一部がワイヤと縦壁との間で半時計回りの循環流を形成し、加工上端部では加工進行方向に向かう流れになるためである。

また、圧力場においても濃色で示す圧力の高い領域が $D_s = -3\text{mm}$ ではワイヤの前方にあるのに対し、 $D_s = -2\text{mm}$ ではワイヤ後方に移動していることが確認できる。さらに、ワイヤが段差に近づくにつれて上側ノズルと工作物上端面との間の圧力が高くなること分かる。

以上の結果より、段差前の $D_s = -3 \sim -2\text{mm}$ でワイヤ近傍の流れ場、および圧力場が大きく遷移することが判明した。このため、加工粉の排出やワイヤ撓みに影響を及ぼすと考えられる。

4.3 粒子軌道解析による加工粉排出状態の考察

次に、段差加工時の加工液ノズル噴射が加工粉排出状況に及ぼす影響を検討するため、加工粉を模した粒子をワイヤ前方の極間で発生させることにより加工粉排出時間を解析した。図 5 に粒子生成点、および解析により得られた加工粉排出軌跡の例を示す。さらに、加工粉排出状況を定量的に評価するために、粒子が解析モデル外に出るまでの時間を算出した。

図 6 に段差からの距離 D_s における加工粉平均排出時間を示す。図より、段差の影響を受けない

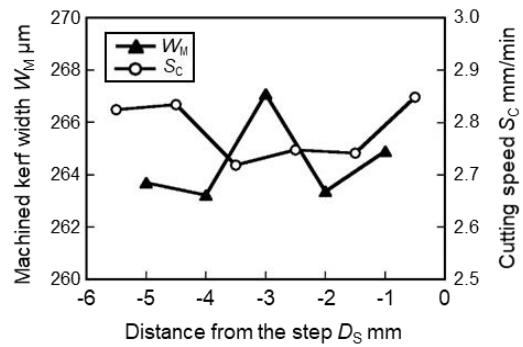


図2 段差からの距離 D_s による加工溝幅と瞬間加工速度の変化

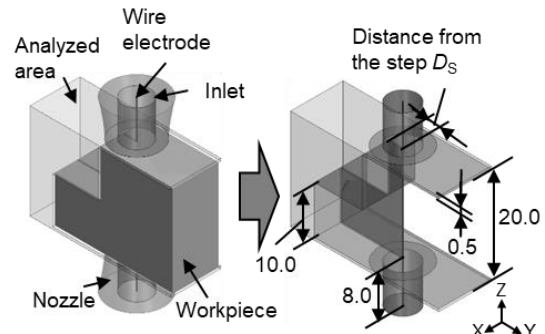


図3 加工液ノズル噴射の CFD 解析モデル

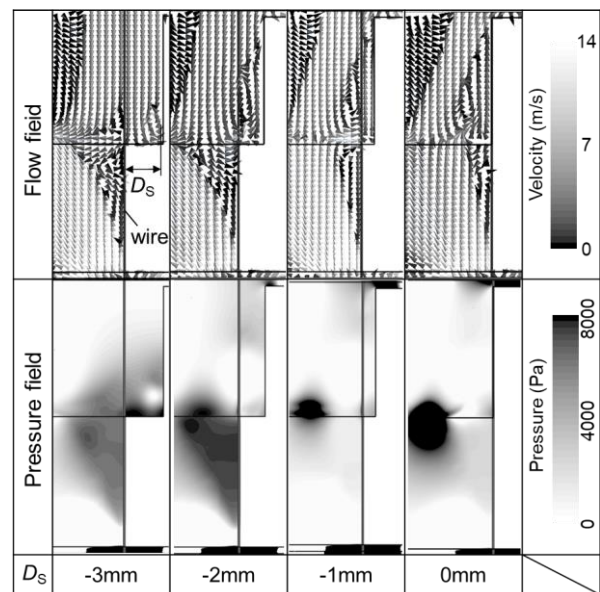


図4 段差からの距離 D_s による加工溝内の流れ場、および圧力場の変化

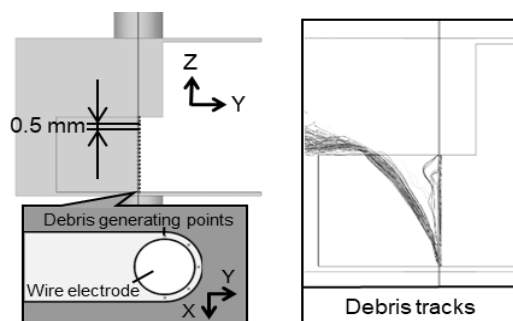


図5 段差からの距離 D_s による加工溝内の流れ場、および圧力場の変化

$D_S = -10\text{mm}$ と比較して、 $D_S = -3\text{mm}$ で加工粉平均排出時間は約 1.5 倍増加することが分かる。これは前項の加工溝内の流れ場解析結果より、 $D_S = -3\text{mm}$ では上側ノズルからの噴流が加工上端部において加工後方に向かう流れとなっており、加工液が加工溝内に適切に流入していないためであると考えられる。これに対して、 $D_S = -2\text{mm}$ 、および -1mm の場合、加工上端部の流れが前方に向かい、加工液の滞留領域が縮小しているため、加工粉排出時間も減少していることが分かる。

4.4 構造解析による加工中のワイヤ撓みの考察

次に、ワイヤの挙動を検討するため、CFD 解析で得られたワイヤ表面の流体力による圧力分布を構造解析モデル表面に与えワイヤ撓みを解析した。ワイヤは黄銅とし、モデル上下端のワイヤガイドの位置で 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 12N 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。構造解析には汎用有限要素プログラム(ANSYS Rev.16.1)を用いた。

図 7 に解析結果を示しており、上段に加工方向後方へのワイヤ撓み D_{WY} 、下段に加工方向に垂直な方向のワイヤ撓み D_{WX} を示す。図より、 $D_S = -3 \sim -2\text{mm}$ で加工に伴って後方への撓み D_{WY} は半分程度に減少することが確認できる。これは前述のように $D_S = -3\text{mm}$ ではワイヤを後方に押す流れが形成されるのに対し、 $D_S = -2\text{mm}$ では加工溝上端部、すなわち上下ワイヤガイド中間部のワイヤ付近を前方に押す流れが形成されるためである。一方、垂直方向の撓み D_{WX} は $D_S = -2\text{mm}$ で大きく増加することが分かる。 $D_S = -2\text{mm}$ 付近で加工液流れが非定常となり、ワイヤ周りの流れ場が加工方向に対して左右非対称に変動するためである。このように $D_S = -3 \sim -2\text{mm}$ ではワイヤ撓みの変動が大きくなることから、ワイヤ断線や加工特性の悪化を引き起こすと考えられる。一方、 $D_S = 0\text{mm}$ では加工厚さが 2 倍になるためワイヤ撓みは増加するものの、放電面積が増加して放電が分散されやすくなるためワイヤ断線は生じないものと考えられる。

以上の結果より、放電面積が狭く、加工が不安定になりやすい段差前では加工粉の滞留とワイヤ撓みの変動がワイヤ断線を引き起こす要因であることが示唆された。

4.5 ノズルフラッシング時の最適噴射流量の検討

ワイヤ断線を低減できる最適な加工液噴射流量の検討を行った。噴射流量はこれまで検討してきた上下 6.0L/min の場合、また総噴射流量を多くした上下 8.0L/min の場合、さらに上側ノズルから 10.0L/min 下側ノズルから 6.0L/min とした場合の 3 条件で比較した。

図 8 に各噴流条件における加工可能条件範囲の結果を示す。加工条件は加工速度に大きく影響

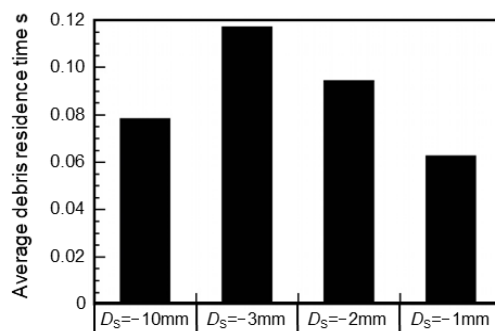


図6 段差からの距離 D_S による加工粉平均排出時間の変化

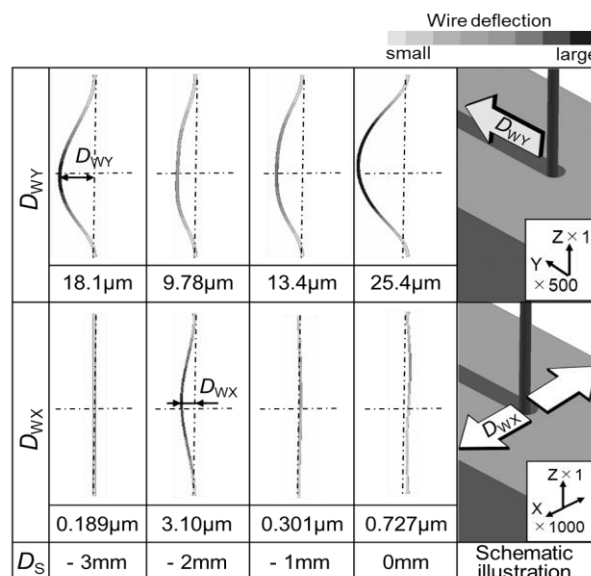


図7 段差からの距離 D_S によるワイヤ撓みの変化

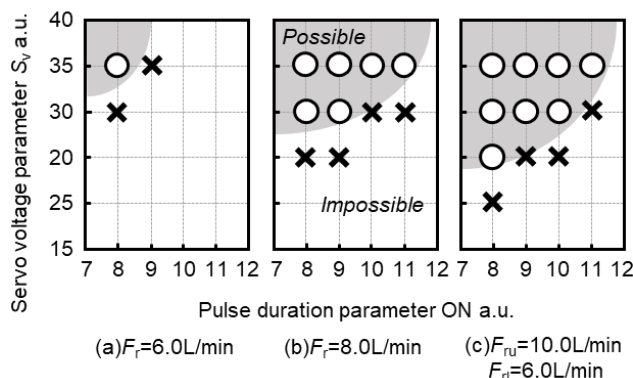


図8 各噴射流量における加工可能条件範囲

を与えるパルス幅パラメータ ON と極間距離を制御するサーボ基準電圧 S_v を変化させた。○は安定して加工が行えた条件、×は加工が不安定となり途中でワイヤが断線した条件を示す。図より、総噴射流量が多く、かつ上側ノズルからの噴流比が大きいフラッシング条件で加工可能条件範囲が広がることを確認できる。

さらに、図 9 に各噴流条件における加工粉平均排出時間、および各噴流条件下での最適加工条件下における $D_S = -5 \sim 0\text{mm}$ の加工速度を示す。図より、総噴射流量が多く、かつ上側ノズルからの噴流比が大きい条件で加工粉平均排出時間が短く

なり、加工速度も増加することがわかる。段差前においても上側ノズルからの噴流が加工溝内に流入し、加工粉排出を促すためと考えられる。

以上のことから、工作物の板厚が 2 倍程度増加する段差加工の際は上下からの総噴射流量を多く、かつ工作物から離れた上側ノズルからの噴流比を大きくすることで加工粉排出性が向上し、ワイヤ断線が低減することが明らかとなった。

4.6 板厚比の違いによる最適噴射流量

これまで板厚が 10mm から 20mm と変化する場合の検討を行ってきたが、段差前の板厚 5mm、および 15mm の設定を加え、板厚比が段差加工時の加工液流れに及ぼす影響を調べた。図 10 に上下ノズルからの噴射流量をそれぞれ 8.0L/min とした場合の、ワイヤ断線が頻発する段差前 3mm 加工時における加工溝内の加工液流れ場、および加工粉排出軌跡を示す。図より板厚 $T_w=10 \rightarrow 20$ mm、および $T_w=15 \rightarrow 20$ mm の場合は上側ノズルからの加工液流れが加工溝内に適切に流入せず、加工溝上部に流速の遅い滞留領域が形成されることで加工粉排出性も悪化することがわかる。これに対し、板厚 $T_w=5 \rightarrow 20$ mm の場合は、下側ノズルからの噴流のみで加工溝内のワイヤ近傍に十分高い流速の流れが形成されており、加工粉排出性も良好である。この噴流条件での $T_w=5 \rightarrow 20$ mm では段差前においてワイヤ断線がほとんど生じないことを確認しており、加工粉排出が良好であるためと考えられる。

次に、各板厚比における最適ノズル噴射流量条件を検討するため、上下ノズルからの総噴射流量を 16.0L/min 一定とし、上下の噴射流量比を変化させてワイヤ放電加工実験を行った。実験ではパルス幅とサーボ基準電圧を変化させ、ワイヤ断線せずに加工が可能な条件範囲を各噴流比において求めた。

図 11(a)に $T_w=10 \rightarrow 20$ mm の場合の加工可能条件範囲を噴射流量比ごとに示す。図より、上側ノズル噴射流量 $F_u=12.0$ L/min、下側ノズル噴射流量 $F_l=4.0$ L/min の場合に加工可能条件範囲が最も広く、最適噴射流量比と定義した。 $T_w=5 \rightarrow 20$ mm、および $T_w=15 \rightarrow 20$ mm の場合も同様に加工可能条件範囲を求め、図 11(b)に各噴流比における加工可能条件の数を示す。 $T_w=5 \rightarrow 20$ mm では上側ノズル噴射流量 $F_u=4.0$ L/min、下側ノズル噴射流量 $F_l=12.0$ L/min の条件が最適となっており、これは前述の流れ場解析より $T_w=5 \rightarrow 20$ mm の場合は下側からのノズル噴流のみでも十分に加工粉が排出されることと一致する。これに対し、 $T_w=10 \rightarrow 20$ mm、 $T_w=15 \rightarrow 20$ mm の場合は上側からの噴射流量を大きくすることで加工可能条件範囲が拡大することが分かる。

これについて詳しく検討するため、 $T_w=10 \rightarrow 20$ mm の場合の加工液流れ場および加工粉排出軌跡を図 12 に示す。 $F_u=12.0$ L/min、 $F_l=4.0$ L/min としたとき、

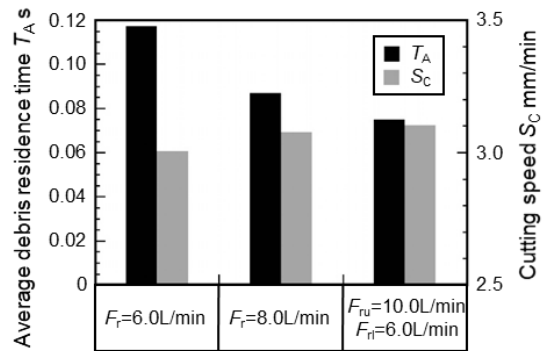


図9 各噴射流量における加工粉平均排出時間および最適加工条件下での加工速度加工

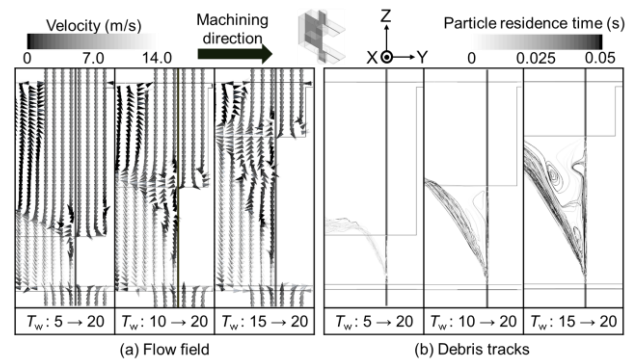


図 10 工作物板厚比による加工溝内の流れ場と加工粉排出軌跡の違い

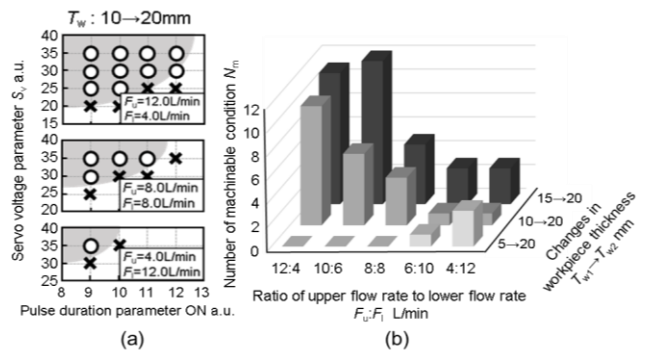


図 11 各板厚比における加工可能条件数

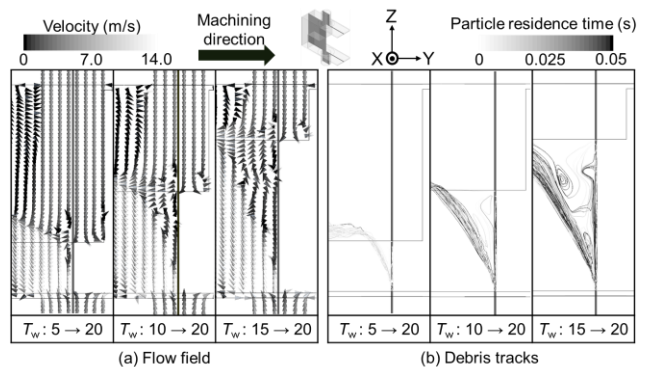


図 12 工作物板厚 $T_w=10 \rightarrow 20$ mm の場合の加工液流れ場および加工粉排出軌跡の変化

上側ノズルからの加工液が加工溝内に流入し、加工粉の排出性が向上することが確認できる。

そのため、段差前のワイヤ断線低減のためには

加工液流れを加工溝内に十分に流入させることが有効と考えられる。また、図11のTw10→20mmおよびTw15→20mmの結果より、上側からの噴流が加工溝内に十分に流入するための噴流比は板厚比によって異なることがわかる。以上の結果より、段差前の板厚が薄い場合は、密着ノズル側からの噴流比を大きく、その他の場合にはノズル距離が大きい側からの噴流比を板厚比に対応して大きくすることでワイヤ断線を低減できることが明らかとなった。

5. まとめ

- (1) 工作物厚さが10mmから20mmに増加する段差形状のワイヤ放電加工では、段差前3mm付近でワイヤ断線が頻発し、加工特性も悪化する。
- (2) 段差前の加工液流れの変化によって、段差前3mm付近で加工粉排出性が悪化し、またワイヤの撓みも大きく変化する。
- (3) 加工液の総噴射流量を増加させ、かつ加工上端面から離れた上側ノズルからの噴流比を大きくすることで加工粉の排出が良好になり、ワイヤ断線頻度を低減させることができる。
- (4) 段差前後の板厚比によってワイヤ断線低減のための最適な上下噴射ノズルの流量条件が存在し、ノズル距離の広い側のノズル流量を工作物段差前後の板厚比に対応して適切に大きくすることでワイヤ断線を低減できる。
- (5) 段差前の板厚が薄い場合は、密着ノズル側からの噴流比を大きくすることでワイヤ断線を低減できる。

6. 謝辞

本研究は公益財団法人金型技術振興財団令和2年度金型に関する金型にかんする研究開発助成の援助の下で実施されました。厚く御礼申し上げます。

7. 参考文献

- [1] Dauw DF, Sthioul H, Delpretti R, Tricario C (1989) Wire Analysis and Control for Precision EDM Cutting. *Annals of the CIRP* 38(1):191-194.
- [2] Han F, Kunieda M, Sendai T, Imai Y (2002) High

Precision Simulation of WEDM Using Parametric Programming. *Annals of the CIRP* 51(1):165-168.

- [3] Cetin S, Okada A, Uno Y (2004) Effect of Debris Accumulation on Machining Speed in EDM. *International Journal of Electrical Machining* 9:9-14.
- [4] Takeuchi H, Kunieda M (2007) Relation Between Debris Concentration and Discharge Gap Width in EDM Process. *International Journal of Electrical Machining* 12:17-22.
- [5] Okada A, Uno Y, Onoda S, Habib S. Computational Fluid Dynamics Analysis of Working Fluid Flow and Debris Movement in Wire EDM. *kerf. CIRP Annals* 2009;58;1:209-212.
- [6] T. Fujimoto, A. Okada, Y. Okamoto, Y. Uno: Optimization of Nozzle Flushing Method for Smooth Debris Exclusion in Wire EDM, *Key Engineering Materials* 516 (2012) 73-78.
- [7] Okada A, Konishi T, Okamoto Y, Kurihara H. Wire Breakage and Deflection Caused by Nozzle Jet Flushing in Wire EDM. *CIRP Annals* 2015;64:233-236.
- [8] Iwai H, Ebisu T, Okada A, Kurihara H. Influence of Nozzle Jet Flushing on Working Fluid Flow and Wire Electrode in Trim-cut WEDM. *Procedia CIRP* 2020; 95:250-254.
- [9] Horio K, Kinoshita N, Fukui M. The Study of Wire Behaviour in Wire EDM (1st report) —Wire Vibration and Discharge Phenomena—. *JSEME Annals* 1981;14;28:30-41.
- [10] Horio K, Kinoshita N, Fukui M. Study of Wire Behaviour in Wire E.D.M.(2nd report) —Explication of Wire Vibration—. *JSEME Annals* 1982;16;31:1-13.
- [11] Crowe C, Sommerfeld M, Tsuji Y (1998) *Multiphase Flow with Droplets and Particles*, CRC Press, Boca Ration.
- [12] Yoshida M, Kunieda M. Study on the Distribution of Scattered Debris Generated by a Single Pulse Discharge in EDM Process. *International Journal of Electrical Machining* 1998;3:39-4