

技術調査(ワイヤ放電加工)-なぜ断線するか-

1. はじめに

ワイヤ放電加工機を担当していると、「断線しました、うまく自動結線が出来ませんでした」という経緯で、加工が止まることがあり、なんとか断線が防止できないものかと、考えてしまいます。

断線は、放電のエネルギーの大小に依存するという道理はあるのですが、なぜ断線するかという理由を、知りたく、調査してみました。

また、先日、技術職員の機械工作技術研究会に参加する機会があり、放電加工面に、高温加工による残留応力が発生し、物性面でどう影響があるかとの問題提起がありました。

本件も可能な範囲で、調査しています。

(熱処理をした材料は、放電加工の影響を受けやすいようです。パルスとはいえ、数千度の熱ですので、熱処理で組織変化させた材料に対しては、放電の熱で更に変化するのかと考えます)

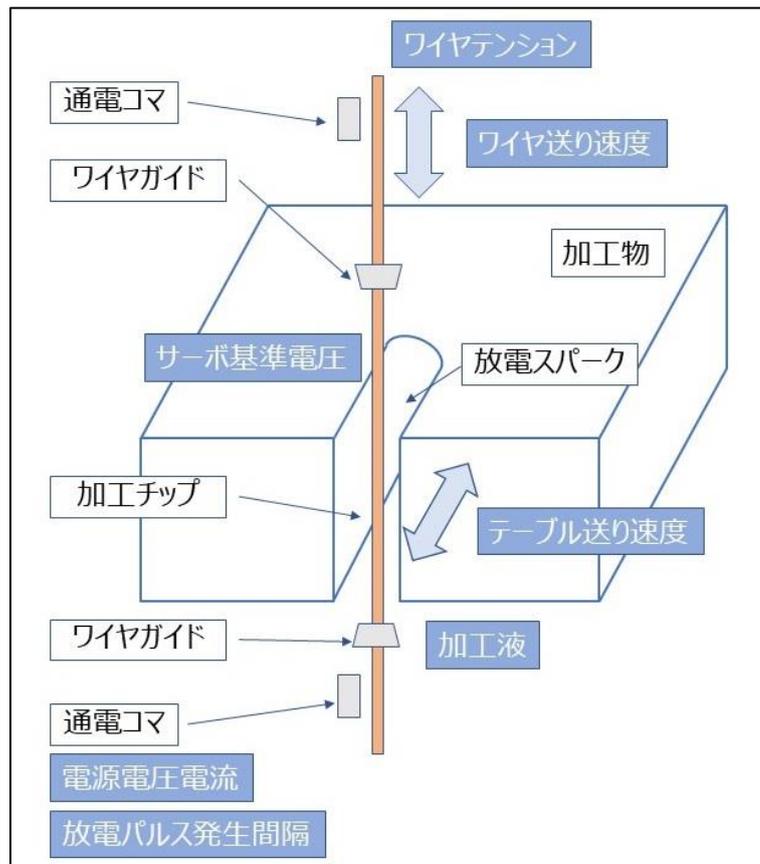
引用・参考 文献

- ・わかる！使える！放電加工入門 編集 ソデック放電加工教本編纂チーム 日刊工業新聞社
- ・放電加工技術-基礎から将来展望まで- 斎藤長男 毛利尚武 高鷲民生 古谷政典
日刊工業新聞社
- ・ワイヤ放電加工機の紹介 三重大学工学部工学研究科技術部
- ・ワイヤ放電加工のワイヤ断線防止制御の研究-第2報放電位置に応じたギャップ信号の区分検出法
小原治樹,安部充,大住剛 電気加工学会誌 Vol.32 No.70(1988)
- ・ワイヤ加工放電におけるワイヤ断線防止制御
佐藤達志,佐藤清侍,三宅英孝,服部広一郎,戸倉和 電気加工学会誌 Vol.48 No.118(2014)
- ・放電加工された高炭素鋼の疲労特性
林忠男,桑原克典 苫小牧工業高等専門学校技術教育支援センター
- ・ワイヤ放電加工における加工面残留応力に関する研究 緒方勲 向山芳世 日原政彦 1991
- ・ワイヤ放電加工した S45C 材の疲労強度 薬師寺輝敏,後藤真宏,鳥居幸代 2015
- ・放電加工における残留応力について 向山芳世,緒方勲 1980

2. ワイヤ放電加工とは、

2.1 概略

ワイヤ放電加工は、0.02mmから0.3mmのワイヤを電極としてワイヤに張力をかけた状態で走行させながら、ワイヤと加工物の間に放電を発生させて糸鋸のようにワイヤ線で金属を切断（除去）していきます。下図が概略イメージ図です。



概略イメージ図において、ユーザーが、管理できる項目は青抜き部です。

- ・ワイヤテンション：大きくすると、ワイヤの振動は少なくなりますが、断線はしやすくなります。
- ・ワイヤ送り速度：早い方が消耗は少ないですが、消費量は増えます。
- ・サーボ基準電圧：ワイヤと加工物の距離を一定にします。

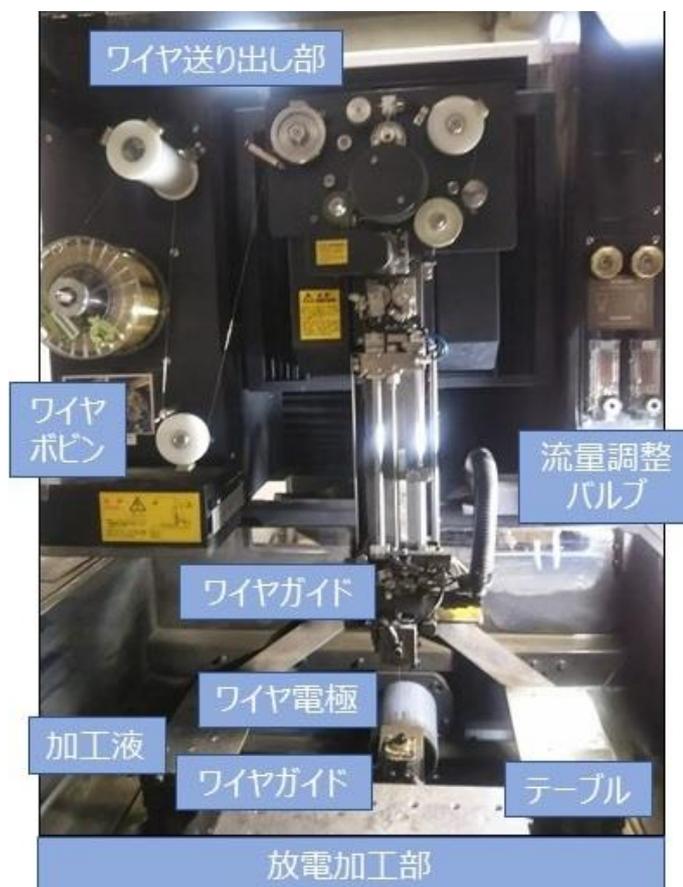
近いと、加工速度は上がりますが短絡の可能性が増えます。

- ・テーブル送り速度：加工速度に関連します。サーボ基準電圧の設定が優先されます。
- ・電源電圧電流：大きくすると、放電のエネルギーは増しますが、断線しやすくなります。

放電パルス発生間隔： ON OFF の時間設定です。

ON が長いと放電のエネルギーは増しますが、断線しやすくなります。

加工液： 放電終了後 加工部を急激冷却し、極間の絶縁回復を行います。加工屑の排除も行います
弊部の放電加工機の写真です。

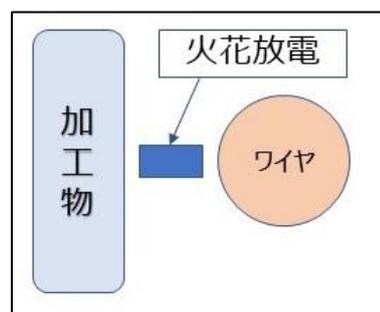


2.2 放電の詳細イメージ

放電加工は、「液中中間隙（ $5\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ ）における印加電圧 $100\sim 300\text{V}$ の過渡アーク放電（ $0.1\mu\text{s}\sim$ 数 ms ）による熱作用 と 加工液体の気化爆発作用により形成された放電痕の累積によって希望する所定の形状を加工する」加工方法です。四つのステップで説明します。

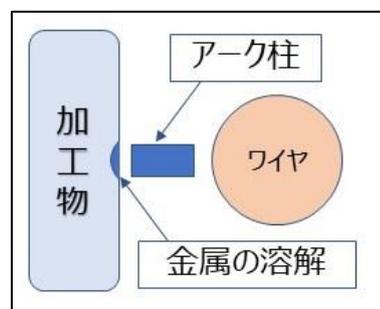
（１）火花放電の発生

ワイヤと工作物のすきま（極間）が十数 μm に達すると、極間にかかっているパルス電圧によって、脱イオン水で保たれていた極間の絶縁が破壊され、そこに火花放電が発生します。



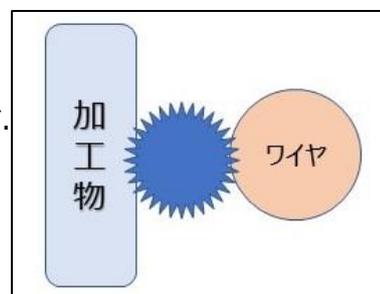
（２）工作物の溶融

火花放電が発生した箇所にパルス電流が流れ込み、電流が持続するアーク柱（熱の柱）となり、アーク柱を中心として、ワイヤと工作物の一部が数千度の高熱にさらされて溶融が始まります。アーク柱は $2\sim 40\mu\text{m}$



（３）爆発・溶融金属の飛散

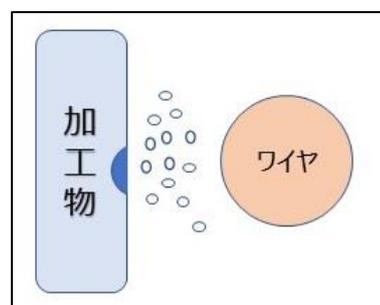
アーク柱を中心として、アーク柱を取り巻いている加工液も急激に温度上昇し、即座に気化し急激な体積膨張を起こします。よって、極間の一部に爆発現象が発生し、工作物およびワイヤ表面の溶融金属を吹き飛ばします。



（４）極間の冷却・スラッジ排除

電流の供給が終わると同時に極間にはきれいな加工液が流入し、溶融金属は冷却されて、細かな粒となって洗い流され、凹みが残ります。

極間は再び絶縁が回復し、次のパルス電圧の供給を待ちます。



電圧パルス 1 発ごとに金属の溶融と除去が行われ、これが毎秒数十万回繰り返され形状が成形されることで、加工が行われています。

3,断線について

3.1 なぜ断線するか？

一般に、ワイヤが、放電熱あるいはジュール熱で、加熱されて温度上昇し、ワイヤ強度がワイヤ張力に耐えられなくなって断線すると考えられています。

ワイヤ加熱の状態は以下の4点として、考えを進めます。

1、放電は長さ方向に均等に発生するが、確率的に温度上昇する箇所が発生する。

->温度分布は一樣にはならず、これは、イレギュラーな状態ではないので、初期の条件設定の見直しになります。

2、異常放電が集中する箇所があり、過熱断線する。

->異常アーク、短絡に起因していますが、その割合は少なく主因とは考えにくいです。

3、局所的に放電が集中して、温度が増加する。

->集中放電なしで断線することが、報告されており、原因の一つであり、全てではないようです。

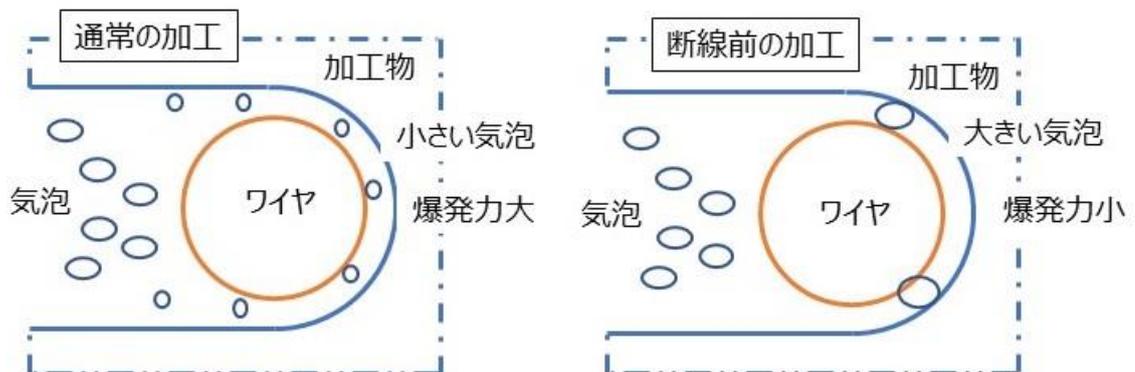
4、局所的な冷却不良が発生している。

→これが原因のようで、以下に詳細を示します。

ワイヤ放電加工中に多量の気泡が発生します。気泡の主成分は水蒸気および水の分解で発生した気泡と言われています。ギャップ中の気泡でワイヤは水に接してないで、冷却できず過熱されます。

正常時は、放電の衝撃を受けたワイヤの振動と放電の直接的衝撃によって、水が激しく攪拌されるため気泡がワイヤの一方所に滞留することはなく、温度上昇は抑制されます。

異常時は、気泡が集合し、ワイヤが運動しても気泡は攪拌されず滞留するので、ワイヤの温度上昇が発生します。



短絡についても同様に説明できます。

通常加工中のワイヤは図のように常に振動していますが、正常加工で気泡が少ない場合にワイヤが加工面に接近すると、水を排除するスクィーズ効果によって強い力がワイヤに働き、また爆発力によってワイヤが押し戻される。従ってこの場合の短絡は稀です。

断線前の加工については、気泡が滞留するので、スクィーズ効果による力と爆発力は小さくなるからワイヤは容易に加工面と接触し、短絡が頻発します。

3.2 断線を防止するには

ワイヤに過度な温度上昇を発生させないことです。そのための対応として、以下があります。

- 1、加工液は、ワイヤの冷却に効果があります。液量、液圧を大きくすることが、断線に有効です。
(薄厚加工については、水圧で加工物が不安定になるので、配慮が必要です)
- 2、上部ノズル位置は、加工液流量確保のため、出来る限り加工物に近接させます。
(加工物の断面形状に凸凹形状がある場合等、断線しやすくなります)

対話型のワイヤ放電加工機の場合、材料、板厚、ノズル位置の条件を入力すると、加工プログラムは、自動で設定されます。それでも断線する事があるので、以下のパラメーターで設定変更をします。

- 1、サーボ基準電圧：ワイヤと加工物の間隔を一定する電圧設定です。

電圧を上げると間隔が広がり、下げると間隔を狭くします。前述にあるように、気泡が断線に関係しているため、間隔を広げることが、有効です。

また、テーブル送り速度も同時に遅くしないと、制御が難しくなります。

- 2、放電パルス時間：放電の ON 時間と OFF 時間を設定します。

断線は、投入エネルギーが必要とする加工エネルギーを上回った時、発生します。

放電の OFF 時間を増して、投入エネルギーを低減します。

3.3 ワイヤ断線防止制御について

各メーカーの放電加工機がどのような断線防止制御をしているのか、詳しい解説がないので不明です。断線と加工時間とはトレードオフになりがちですので、断線の限界までのエネルギーで加工することが、課題となります。また、ワイヤの過度な温度上昇を事前検知できれば良いのですが、瞬時の局所的な温度上昇であるため、ワイヤの平均温度を推定しても、断線するレベルの温度には達しないようです。

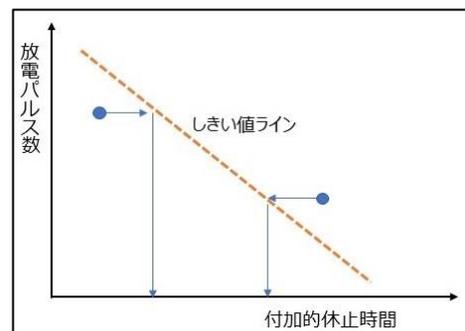
ここで、断線防止制御に関する研究論文があったので、紹介します。

断線する限界を示す「しきい値ライン」が存在し、放電パルス数と、付加する休止時間と関係で構成されるという内容です。

右図において、「しきい値ライン」の下側になると、断線状態となります。上側は、断線はしませんが、加工効率は良くありません。したがって、加工が、「しきい値ライン」上にくるように、制御します。

「しきい値ライン」は、板厚で異なります。

板厚の変化は、加工電流と加工体積（速度 × 板厚）とで比例するので、加工電流と、速度から算出するようです。



4.ワイヤ放電加工による影響（残留応力の件）

放電加工は、加熱と冷却の繰り返しであるので、加工面への影響が考えられます。

変質層組織、微細クラック、残留応力等であり、特に、残留応力は、疲労強度に影響します。

残留応力のデータを採取した論文を3点紹介します。

（炭素鋼に関するもののみで、熱処理方法で差があるようです）

SKD11の例です。熱処理した材料への放電は疲労強度への影響は大きくでるようです。

焼き入れ-焼戻し材では、ワイヤ放電加工品は研削処理と比較して35%低下し、

熱処理をしない材料、焼鈍材では、その差は無いというレポートがあります。

ワイヤカット時の放電加工面は10~20 μm の加工変質層が観察されたとのことです。

SKD11の例です。放電による熱応力発生の際、塑性領域が生じた結果、加工面残留応力として残

留します。実験例では、焼入れ材の場合、発生深さは25 μm であり応力は400Mpa、

焼鈍材の発生深さは60 μm であり応力は100Mpaであったとのことです。

S45Cの例です。

焼きならし-焼戻し材では、疲労強度について、ワイヤカットは素材と比較して44%低下し、

焼鈍材では、疲労強度の差は荒加工で10%程度、2回仕上げで同等であったとのことです。

放電加工による変質のまとめ

- ・材料は、内部に初期の応力を保持していて、放電加工により発生した応力と重畳され、残留される。
- ・加工された表面から数 μm ~数十 μm の間は、放電時の熱による影響を受けていて、この変質層は、クラック、残留応力が発生していると考えられる（特に熱処理を加えた材料は、その程度が大きい）
- ・放電による仕上げで、ある程度の変質層の除去は可能となる。
- ・研磨、ブラスト処理で完全な、変質層の除去は可能となる。