



層を「焼戻し層」と呼ぶこともある。本図は、放電エネルギーの比較的低い中加工面の例であるが、表面には 20 数  $\mu\text{m}$  の加工変質層が存在するため、その後の仕上げ研摩代としては、それ以上が必要である。

### 3. 放電加工面のトラブル事例とその対策

#### (1) 冷間鍛造金型の型割れ (腕時計用金型 SKH51)

鍛造金型のように使用中に大きな衝撃力を受ける金型では、型寿命は放電加工やその後の仕上げ状態の影響を顕著に受ける。

図2は型割れ箇所の拡大写真と近傍の断面組織を示す。本例の金型は、放電加工後に仕上げ研摩が施されたにも

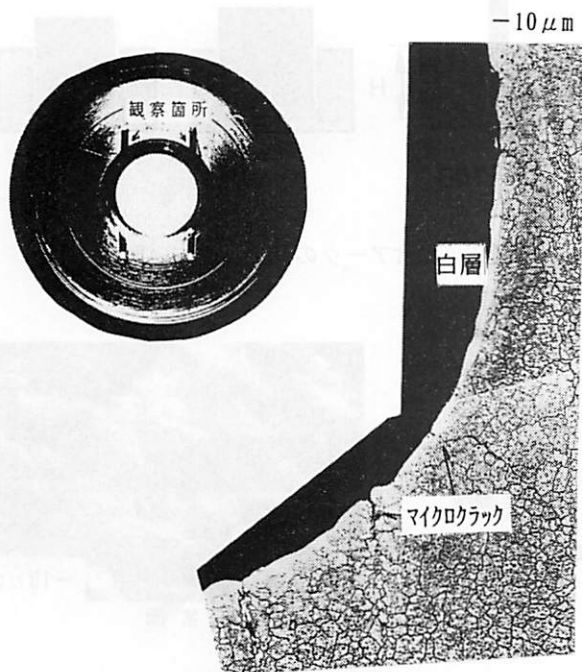


図2 型割れ箇所の拡大写真と断面組織  
(腕時計用鍛造金型 SKD11)

- \*1) 電極ジャンプ：加工中の電極を上下に運動させ、加工液のフラッシング効果を高めることにより、加工屑や発生ガスの排出を促し、加工状態を安定にする方法。
- \*2) 揺動機能：加工中の電極と工作物の間に微小な相対運動を与えて、加工液のフラッシング効果を高めることにより、加工状態を安定にする機能。
- \*3) 正極性仕上げ加工：工作物を陽極、電極を陰極とし、放電のピーク電流が数アンペアで、その持続時間が数  $\mu$  秒なるパルス波形による加工。
- \*4) ガラスブラスト：微細径のガラスビーズを圧縮空気とともに噴射させ、部品のバリ取りやスケール・さびの除去、梨地処理などを行う噴射加工法の一つ。

かかわらず、表面には放電加工で形成された白層にマイクロクラックが観察される。特に、プレス加工のように衝撃力を受ける金型では、放電加工時の表面欠陥は、金型のチッピングや型割れなどのトラブル原因になりやすい。

こうしたトラブルの対策としては、放電加工時の表面欠陥層を極力少なくすることと、さらにその後の仕上げ研摩で欠陥層を十分に除去することが必要である。

放電加工面の改善には、電極のジャンプ動作<sup>\*1)</sup>や揺動機能<sup>\*2)</sup>を活用し、局部的な放電の集中や異常放電の発生を抑制するとともに、放電時間幅の短いパルスによる正極性仕上げ加工条件<sup>\*3)</sup>が有効である<sup>1)</sup>。

また、放電加工後の仕上げ処理には、各種のハンドラッピングの他に、ガラスビーズを用いたブラスト処理<sup>\*4)</sup>がある。この場合、ブラスト処理を施すとピーニング作用により放電加工面に存在する引張り残留応力が圧縮側に改善され、型寿命の延長効果も期待できる。

#### (2) マイクロクラックの発生

##### (粗大な炭化物の影響 SKD11)

放電による熱的な溶融除去作用を利用する放電加工では、加工表面の性状は工作物素材の影響を大きく受ける。加工面を細かく均一に仕上げるには、緻密で均質な材料組織が望ましい。しかし、合金工具鋼 (SKD11) のように粗大な炭化物が存在すると、条件によっては、図3のような炭化物にクラックが発生し、前項と同様にチッピングや型割れなどの原因になる。

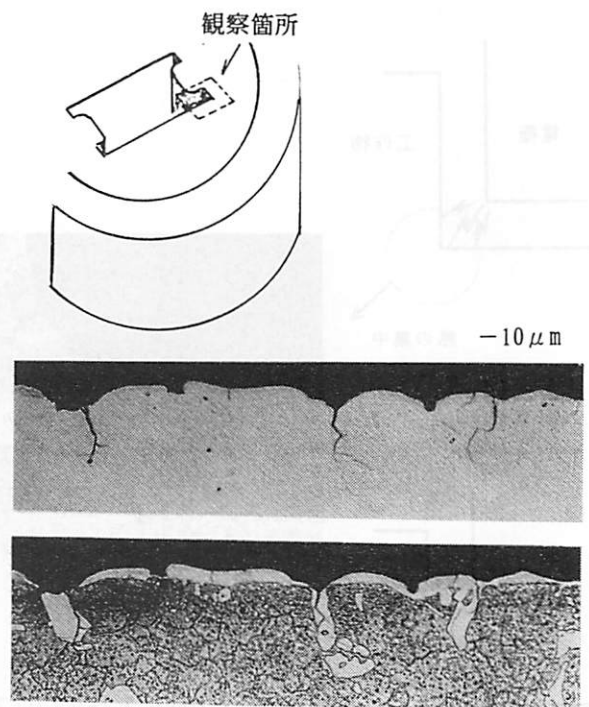


図3 粗大炭化物のマイクロクラック (SKD11)

こうしたトラブルを防止するには、加工条件としては放電のエネルギーはあまり高くせず、さらに、休止時間を長くするなど、熱の局所的な集中を抑えることが必要である。また、平均加工電圧を高く設定し、加工間隙を広くするのも効果的である。

(3) エッジやコーナ部でのクラック (SKD11)

図4のように電極面にシャープなエッジやコーナ部が存在する場合、工作物側に大規模なクラックが発生することがある。この原因としては、荒加工条件で放電のエネルギーが高いか、または、放電の休止時間が短いために、エッジやコーナ部において局所的な発熱を生じ、結果的にクラックが発生したと考えられる。一旦、荒加工で大規模なクラックが発生すると、後の仕上げ放電加工で完全に除去できないばかりか、ノッチ効果が作用し、さらに深く進展することもある。

この場合の対策法として、荒加工時の放電のエネルギーはあまり高くせず、放電の休止時間を長くし、平均加工電流を低くすることで発生熱の分散化を図る。また、電極を荒加工と仕上げ加工用として複数本使用する場合は、同図のように荒加工用電極のエッジやコーナ部に丸みをつけると熱の分散効果を高めることができる。

なお、SKD11は硬さを優先して耐摩耗性の向上を図るために、所定の温度で焼入れ後、150~200℃で焼戻しを行う、いわゆる低温焼戻し材が使用される場合がある。しかし、低温焼戻し材では、焼入れ時に発生する応力がかなり内在するため、それが放電加工中、応力解放にと

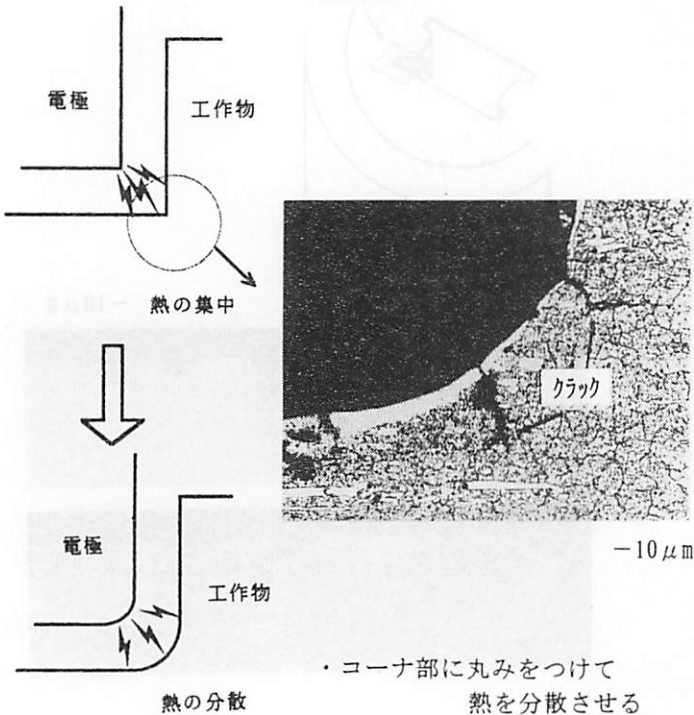


図4 コーナ部でのクラック (SKD11)

もなう素材の変形やクラックの発生を助長すると考えられる。したがって、放電加工を行う工作物 (SKD11) としては、硬さはやや低下するが、内部応力が少なく高い靱性が得られる高温焼戻し材 (JIS焼戻し温度: 500~530℃) の使用が望ましい。

(4) 異常アークの発生 (腕時計用金型 SKD11)

通常、放電加工における異常アークは、加工屑の局所的な堆積や、さらに、加工液からの熱分解カーボンの生成などによる放電の集中状態をいう。このような異常アークは、図5に示すような加工屑の排出し難いリブ形状や突起部、また、表面積の大きい仕上げ加工などに多く発生しやすい。

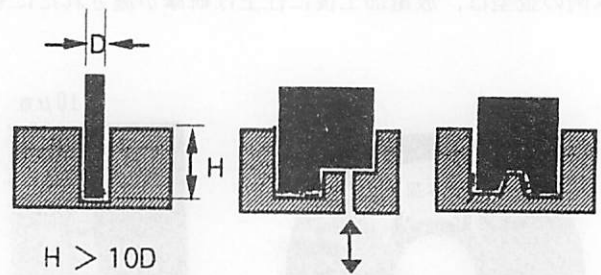


図5 異常アークの発生しやすい形状

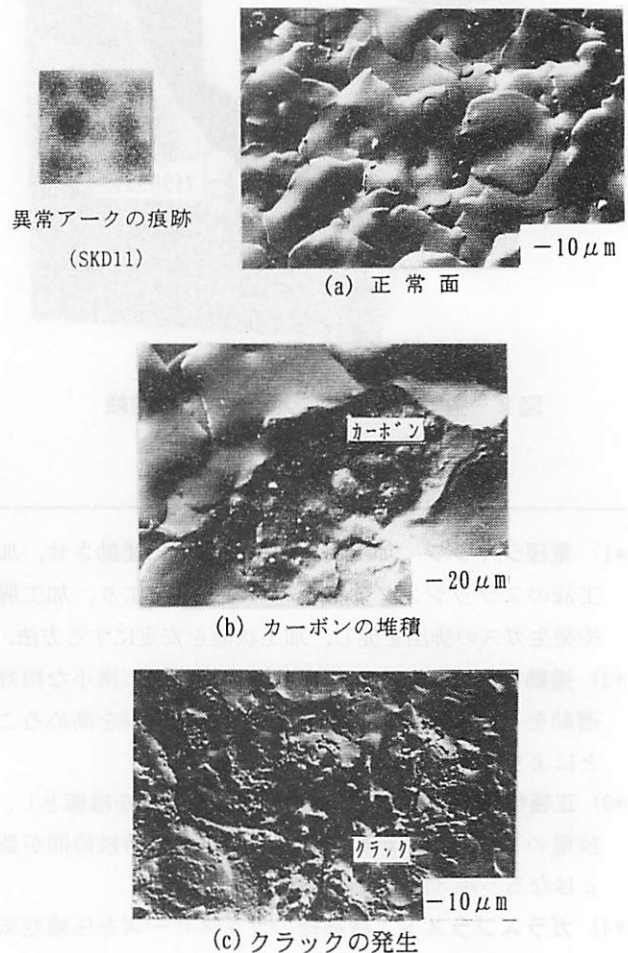


図6 異常アークの発生箇所とその拡大

図6は異常アークの発生箇所とその拡大写真を示す。放電が集中すると熱分解カーボンが堆積し、さらにこうした状態が続くとクラックの発生につながる。

異常アークの発生は、加工速度の低下や電極の異常消耗のみならず、金型ではオシヤカに至るなど、致命的なトラブルにつながりかねない深刻な問題である。

図7は腕時計用鍛造金型に発生した異常アーク痕の写真を示す。異常アークとそれとともなうクラックは突起部で発生している。本例の場合、加工液のフラッシングや加工屑の排出状態が比較的良好であったにもかかわらず、こうしたトラブルを生じたのは、荒加工時における放電の休止時間が短く、必要以上に高い平均加工電流（通常  $10\text{A}/\text{cm}^2$  以上）で加工したことが原因であると考えられる。

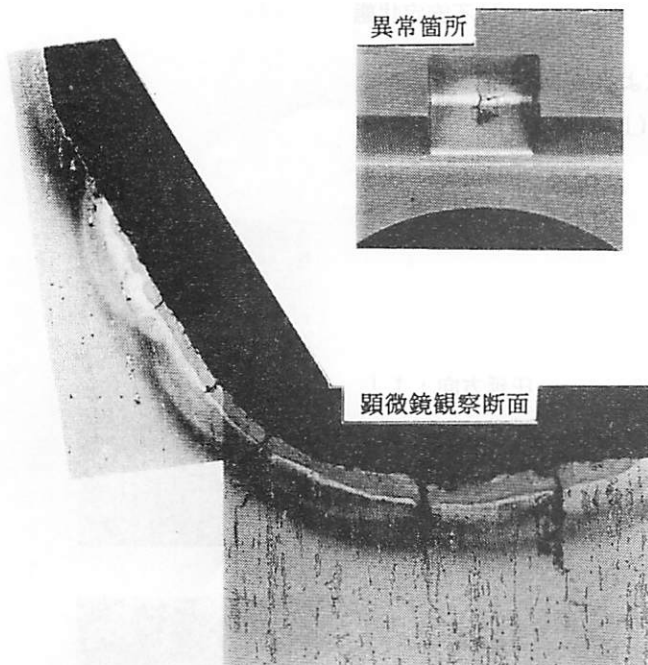


図7 腕時計用鍛造金型での異常アーク痕 (SKD11)

電極と工作物が十分馴染んでいない加工開始時は、部分的な箇所に放電が集中し、加工面にクラックを生じたり、電極面を損なうことがある。加工の開始時は、電極をジャンプさせながら図8のように放電のピーク電流は低く、また、休止時間はやや長めに設定し、加工の進行にともない平均加工電流を徐々に高めるような操作が必要である。

また、底付き加工やリブなどの深溝加工では、加工液のフラッシング状態が悪化するので、電極ジャンプのストロークを長くし、その場合のジャンプ速度もやや高くすると良い<sup>2, 3)</sup>。

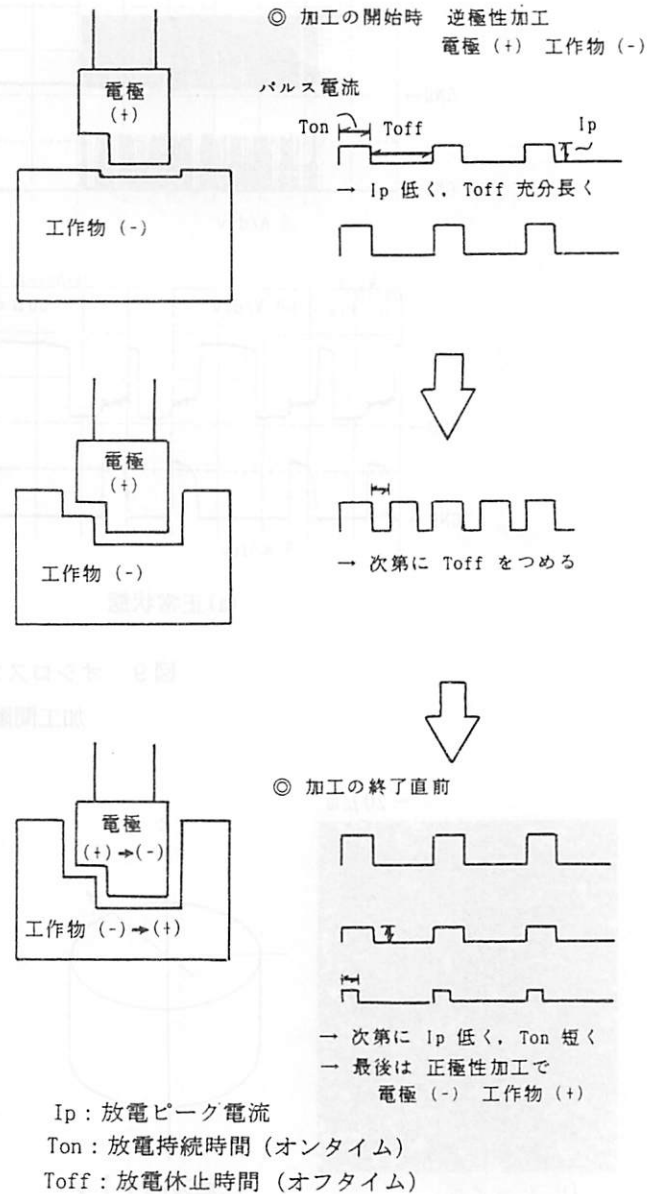


図8 放電パルスの設定

図9はオシロスコープによる加工間隙における電圧・電流波形の観測例を示す。加工状態が不安定になると、本例のように定常的な波形に変動が現れ、放電による生成物を介した漏れ電流（矢印）が流れるので、やがて異常アークや短絡などのトラブルに陥ることをある程度予測することができる。このように放電加工におけるオシロスコープの活用は、外部から見ることでできない加工状態の判断には、極めて有用なモニター手段である<sup>4, 5)</sup>。

#### (6) 工作物の異常組織（偏析 SKD11）

丸棒や角棒などの圧延材を使用する場合、図10のように圧延方向に垂直なXY断面の中央部では、炭化物がファイバーフローとして偏析しやすい。したがって、できる限りこうした箇所の使用を避けるとともに、十分に鍛造された型材の使用が望まれる。

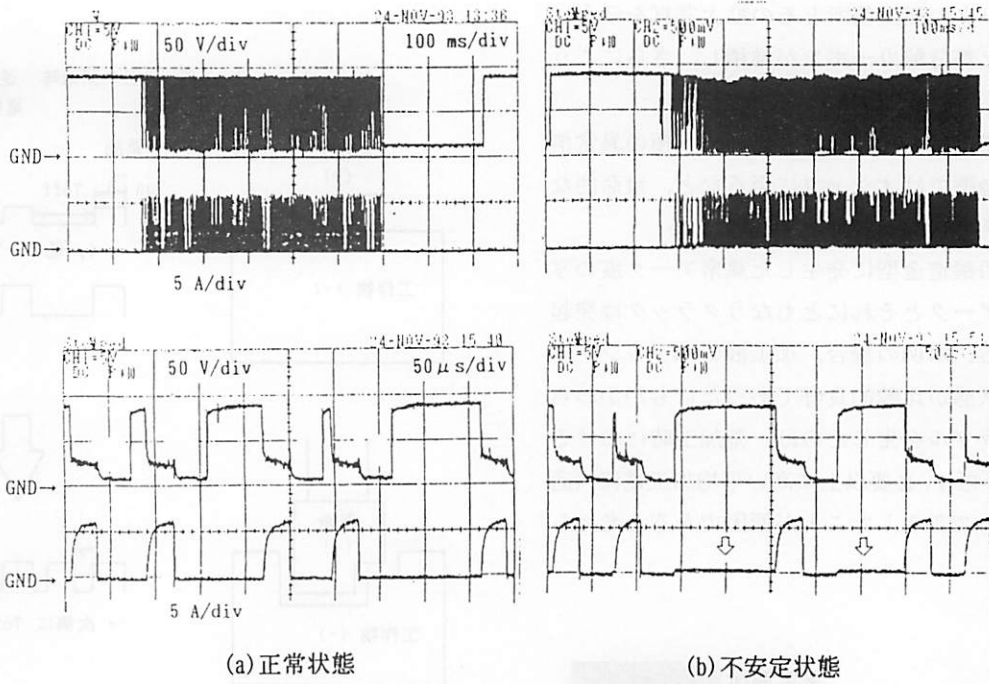


図9 オシロスコープによる加工状態の観測  
加工間隙の電圧(上)・電流波形(下)

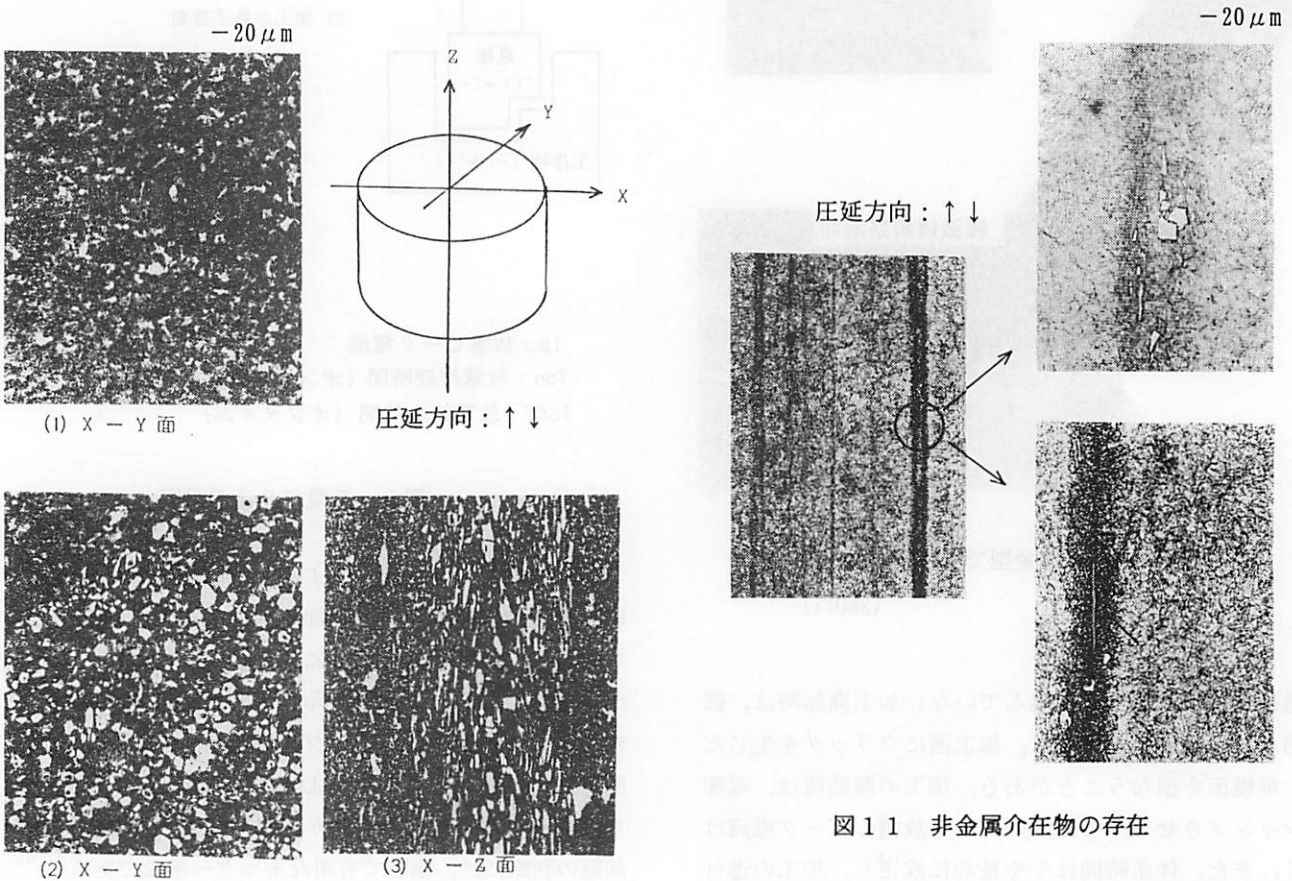


図10 工作物の異常組織  
(炭化物の偏析 SKD11)

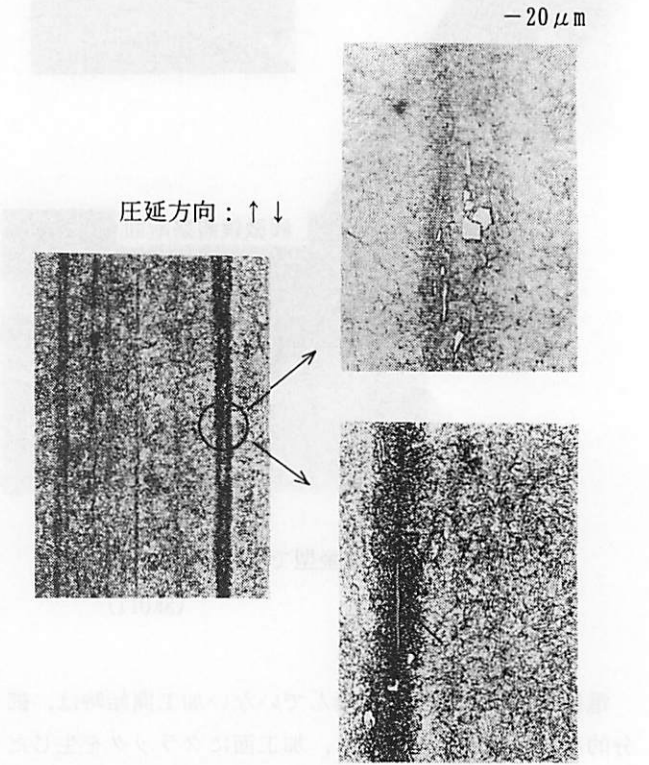


図11 非金属介在物の存在

また、図11のように非金属介在物が素材に存在すると、放電加工面にピンホールや縞模様が現れる。

こうした炭化物の偏析や非金属介在物の存在は、素材を鏡面にラッピングすると、100~200倍程度の顕微鏡で容易に観察することができるので、高精度加工にはこのような素材管理が重要であろう。

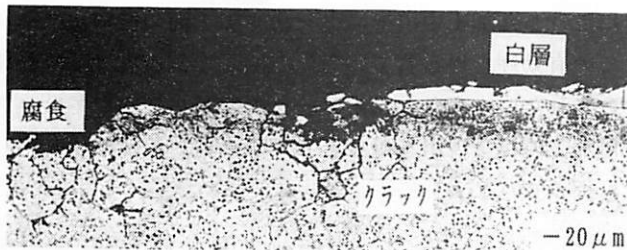
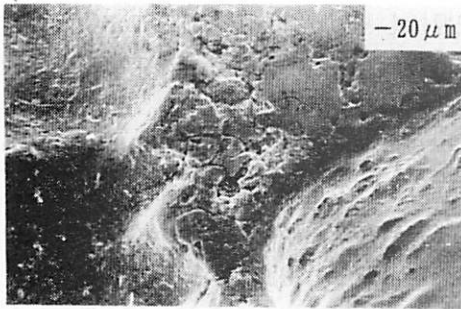
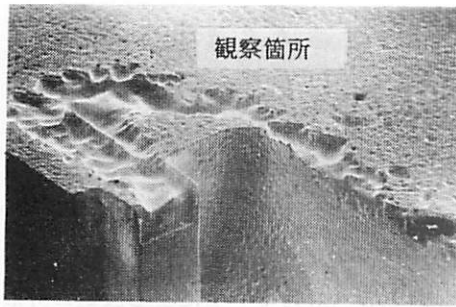


図12 プラスチック成形金型の腐食例  
(SUS420J2)

(7) プラスチック成形金型の腐食

(放電シボ加工面 SUS420J2)

放電加工で形成される梨地面は、プラスチック成形金型のシボ加工面として多く使用されている。しかし、塩化ビニルや難燃剤が添加された複合プラスチックなどの成形では、使用中に金型表面に腐食が発生しやすい。

図12はマグネットコイルのポピン用金型に発生した腐食箇所のSEM写真、及び、断面組織を示す。本例は放電加工で  $R_{max} 5 \mu m$  程度に仕上げられていたものである。腐食は放電加工で形成された白層のマイクロクラックが起点となり、孔食としてさらに内部に進展している。

放電加工面をシボ加工面としてそのまま使用することは、前項で示した正極性低電流パルスによる加工条件を設定し、クラックの発生しない滑らかな仕上げ面を得る必要がある。

また、放電加工面に発生する引張り残留応力も腐食を助長すると考えられるので、放電加工後にガラスプラス

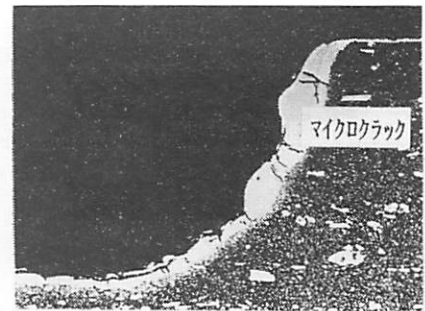


図13 クロムめっき膜の剥離  
(ICモールド金型 SKD11)

トによるピーニング処理を施すと、さらに耐食性が向上する<sup>6, 7, 8)</sup>。

(8) 放電シボ加工面でのクロムめっき膜の剥離  
(ICモールド金型 SKD11)

前項と同様に、放電によるシボ加工面をICのモールド金型として使用する場合、離型性を高めるためにクロムめっきが施される。

図13は金型としての使用中にめっき膜が剥がれた箇所の断面組織を示す。本例の放電加工面には、マイクロクラックをともなった白層が  $20 \mu m$  以上も存在し、それがめっきの付着効果を妨げたと考えられる。

元来、放電加工面に形成される白層には、めっきの付着性が低いので、放電加工時の白層をできる限り薄く、さらに、クラックの発生を少なくするような条件が必要である。例えば、低電流パルスによる仕上げ加工の安定化を図るために、電極のジャンプ動作や揺動機構を効果的に活用すべきであろう。

(9) 揺動加工の落とし穴

揺動加工は、加工中の電極と工作物の間に微小な相対運動を与え、加工液のフラッシング効果を高めることにより、安定な加工状態を維持する加工法である。通常、中加工以降に使用され、特に、加工間隙の狭い仕上げ加工において効果が得られる。

しかし、放電エネルギーの高い荒加工では、図14に示すような電極に突起がある場合は、揺動の動作を円または四角モードで行うと、突起部で放電が集中し、クラックを生じることがある。

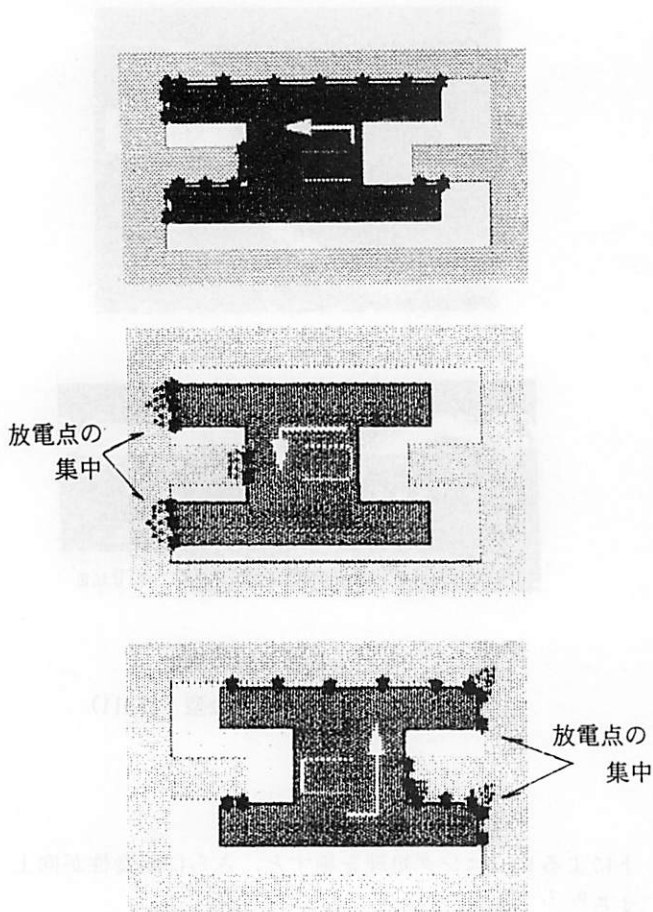


図14 揺動加工時の放電集中（四角モード）

揺動加工時の放電の集中を抑えてその分散化を図るには、図15に示す対角方向の揺動モードが望ましい。なお、荒加工では、加工速度の低下やコーナ部でのクラックの発生を防ぐために、揺動動作よりも電極のジャンプ動作が多く使用されている。

以上、これまで述べた放電加工面のトラブル事例と、その対策法についての早見表を表1に示す。

通常、こうしたトラブル対策の実施に際しては、例えば、加工速度が低下するなど能率面での問題点は否めない。しかし、加工された金型の品質や信頼性、さらには経済効果を考慮すると、極めて重要な対策手段であると思われる。

#### 4. あとがき

本稿のトラブル事例は、放電加工面に関する代表的なものを紹介したが、それらの原因としては、放電加工がきっかけになっているが、放電以外にいくつかの因子が複雑に絡み合っている場合が多い。金型製作において放電加工をより効果的に活用するためには、加工状態の適

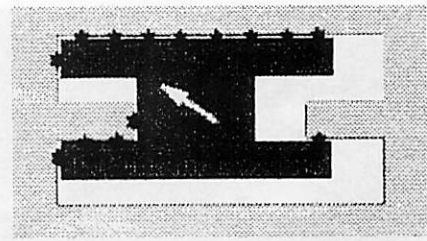


図15 対角モードによる放電の分散

切な把握はもとより、被加工材（工作物）の種類や前熱処理をはじめとする熱履歴などの素材管理も極めて重要である。

最近の放電加工機は、高度な制御機能が装備されているとはいうものの、加工中の異常状態を完全に回避するには至っていない。作業者にとっては、加工中の放電音や火花の色、電圧・電流計の振れ、さらにはオシロスコープを用いた波形観測などとともに、得られた加工面との因果関係を知ることも必要である。当所では、伝統的にこうした加工中のモニター法や加工面の観察法についての有効性を提案している。ご関心のある方は、ぜひ照会されたい。また、異常アークの回避法については、放電加工の作業現場を対象とした研修用ビデオの貸し出しも行っている。

最後に本稿の事例にご協力頂いた関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 増井ら：単発放電痕の性状解析，電気加工学会全国大会講演論文集，(1991)119
- 2) 増井ら：減圧雰囲気中における放電加工，型技術，10，7(1995)126
- 3) 増井ら：放電加工における異常アークの回避，型技術，11，13(1996)84
- 4) 五十鈴川ら：放電加工における電流モニターについて，電気加工技術，6，17(1983)1
- 5) 谷村：簡易放電電流波形モニター，センサ技術，4，3(1984)71
- 6) 佐藤ら：放電加工したプラスチック用金型材の耐食性評価法，防錆管理，34，9(1990)5
- 7) 増井ら：放電加工面の耐食性とその改善，電気加工技術，14，44(1990)12
- 8) 増井ら：放電加工面のプラスチック成形雰囲気中における耐食性とその改善，電気加工学会誌，26，52(1992)36

表1 金型製作における放電加工面のトラブル事例とその対策

放電加工面のトラブル例	原因	対策
(1) 冷間鍛造金型の型割れ (腕時計用金型 SKH51)	・放電加工面にマイクロクラック ・放電加工面の仕上げ研磨不十分	・低電流パルスによる正極性加工 ・各種のハンドラッピング ・放電加工面にブラスト処理
(2) マイクロクラックの発生	・材料組織の不均一, 偏析	・加工前に素材の組織観察 ・平均加工電圧を高く ・放電の休止時間を長く
(3) エッジやコーナ部での クラック発生 (SKD11)	・低温焼き戻し材による内部残留応力の存在 ・荒加工時の放電のエネルギーが高い	・高温焼き戻し材の使用 ・荒加工時の放電のエネルギーを低く ・放電の休止時間を長く ・平均加工電流を低く ・荒加工用電極のエッジやコーナ部に丸みをつけて熱の分散効果を高める
(4) 異常アークの発生 (腕時計用金型 SKD11)	・加工屑の局所的な堆積 ・加工液のフラッシング不足 ・荒加工時の放電の休止時間が短い ・加工中の平均電流が高すぎる	・十分な加工液のフラッシング ・電極ジャンプのストロークを長く ・電極ジャンプの速度を高く ・平均加工電流を低く
(6) 工作物の異常組織 (SKD11) (ピンホールや縞模様の発生)	・非金属介在物の存在	・加工前に素材をラッピングし組織を観察
(7) プラスチック成形金型の腐食の発生 (放電シボ加工面 SUS420J2)	・放電加工面が粗い ・放電加工面にマイクロクラック ・放電加工面に引っ張り残留応力	・低電流パルスによる正極性加工 ・放電加工後にガラスブラスト処理
(8) 放電シボ加工面でのクロムめっき膜の剥離 (ICモールド金型 SKD11)	・放電加工面にマイクロクラック	・低電流パルスによる正極性加工 ・電極のジャンプや揺動機能の活用
(9) 揺動加工の問題点 (エッジやコーナ部でのクラックの発生)	・荒加工時に円または四角揺動を使用 ・エッジやコーナ部に放電が集中	・荒加工では電極のジャンプ動作 ・対角方向の揺動モードの使用 ・揺動機能は中, 仕上げ加工で使用

## 当所での放電加工面性状に関する参考文献

- 増井ら：放電加工における加工面性状, 応用機械工学, 30, 12(1989)90
- 増井ら：放電加工面の性状と高品位化, 精密工学会誌, 57, 6(1991)13
- 増井ら：放電加工による表面の合金化処理, 電気加工技術, 16, 53(1992)38
- 増井ら：放電加工面の高機能化, 電気加工技術, 18, 58(1994)3
- 増井ら：放電加工面の高機能化, 大阪府立産業技術総合研究所研究報告要旨集, (1994)6
- 上田ら：シリコン粉末添加放電加工による加工面の機能性向上, 電気加工技術, 19, 62(1995)19
- 増井ら：金型放電加工面の高品位・高機能化, 型技術, 10, 11(1995)54
- 上田ら：プラスチック成形雰囲気中における金型の耐食性評価, 43, 2(1997)58
- 袖岡ら：インターネット技術を応用した放電加工トラブル回避に関する技術支援システムの構築について, 平成8年度大阪府立産業技術総合研究所研究発表会要旨集, 59