UDC 621.9.018.5: 621.311.69.018.753

論文

57-B 6

階段状パルスによる低消耗放電加工

(故) 元 木 幹 雄

正 員 猪 飼 健 夫 (和歌山高専)

1. ま え が き

絶縁性液体中に対立した微小なギャップの長さの電極間に、短時間の過渡アーク放電を繰返し、放電に伴う電極消耗現象を応用して各種金属材料を精密に加工する放電加工法においては、機械加工の工具に相当する工具電極の消耗が比較的大なる欠点があったが、焼入鋼に対する放電加工では、工具電極が正、被加工体を負とする逆極性接続のもとに、放電電流を比較的低くし、かつ、放電時間を比較的低く設定する低消耗放電加工法の開発により、この問題も解決されつつある⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

しかし、周知のように工具電極の消耗と加工表面のあらさは、放電時間の影響を受け、時間が長いと電極消耗は少ないが、その反面、加工面が悪くなり、逆に時間が短いと消耗は増大するが面は良くなる傾向がある。従って、仕上げ加工の領域では加工面あらさの小さいことが要求されるので、放電時間が短くて加工面の良い放電加工条件における工具電極の低消耗化が放電加工の技術分野での重要課題になっている現状である。

本研究は上記の問題に対処するため、放電時間の短い加工条件における低消耗放電加工を目的としたもので、2段の階段状パルス電流を採用し、初段パルスの電流値および時間幅の適当な選定により、従来の単なる方形波電流の場合に比べて、面あらさを悪くすることなく、格段の低消耗放電加工を可能とした成果を報告するものである⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。

更に、放電加工において過渡アークを反復した場合放電ギャップにおける諸現象解明の一環として、階段状パルスにおけるアーク電圧の変化および反復放電における放電休止期のギャップ抵抗の動的な変化につい

て研究した成果もあわせて報告する⁽¹¹⁾。

2. 実験方法

図1の左半分は絶縁性液体中に対立した微小ギャップ長の工具電極 E と被加工体 W との間に、図2に示すような2段の階段状パルス電流の過渡アーク放電を反復する放電加工回路で、また右半分は後述のギャップ抵抗測定回路である。図中の 2SC246 のパワートランジスタ T_{r1} のスイッチ作用によって階段状パルスの初段、すなわち図2におけるアーク電流 I_1 、アーク時間 τ_1 の放電を発生させ、引き続き立上がり時間が $0.07\mu s$ の高速スイッチ用 XGSR のパワートランジスタ T_{r2} によって階段状パルスの第2段、すなわち図2の アーク電流 I_2 、アーク時間 τ_2 の放電を発生させた。実験は第2段の電流 I_2 を一定とし、初段の電流 I_1 およびその時間幅 τ_1 を適当に変化して行なった。また反復放電における衝撃係数 τ/T は放電加工の分野における従来の慣行に従い、すべての実験で 0.5 一定とした。

図1 実験回路

Fig. 1. Experimental circuit.

図2 階段状パルス

Fig. 2. Stepformed pulse.

Electric Discharge Machining with Low Electrode Wear Ratio by using Stepformed Pulse Current. By Mikio Motoki, Member (In former time: Faculty of Engineering, Doshisha University) & Takeo Ikai, Member (Wakayama Technical College).

(故)元木幹雄: 元正員, 当時, 同志社大学工学部

猪飼健夫: 正員, 和歌山工業高等専門学校

なお、絶縁性の加工液としては白灯油を用い、外径 20mm、内径 6mm の銅を工具電極として、SK 4 焼入鋼板の被加工体を放電加工した。直流電源 V_s の電圧は 100V で、工具電極と被加工体の極性はいわゆる逆極性接続にした。また図 1 の抵抗 r は電流波形観測用の無誘導抵抗で、抵抗値 1.75m Ω の円板形分流器を使用し、放電波形の観測にはソーネクトロニクス 465 形 (100MHz、立上り時間 3.5ns)、オシロスコープを用いた。電極消耗量は感量 1/10mg の直示天びんで求め、工具電極の消耗重量と被加工体の消耗重量の比をもって電極消耗比 γ とした。過渡アークの繰返しによって両電極は順次消耗するから、電極消耗に応じて絶えず数十ミクロン程度の適当なギャップの長さを維持する必要がある、本実験ではギャップ電圧を信号として油圧サーボ方式によって、工具電極の送給を自動制御した。なお、ギャップ長 l の測定には、0.001mm 目盛ダイヤルゲージにより加工中の工具電極の位置と、加工を停止した後工具電極を徐々に送給して被加工体に接触させたときの位置を測定して求めた。

3. 除去速度と消耗比

比較的アーク時間の短い加工条件において、階段状パルスの過渡アーク放電を白灯油中にある数十ミクロン程度の電極間に繰返して供給し、種々の条件のもとでの電極消耗量を測定して方形波電流の場合と比較した。

放電加工では工具電極の消耗の比較的激しいことが一つの欠点になり、工具電極の消耗速度 M_E と被加工体の除去速度 M_W との比 $\gamma (M_E/M_W)$ の値が低消耗放電加工か否かの目安になるので、電極消耗比 γ の変化に着目して、階段状電流波形の影響を検討した。

〈3・1〉 初段電流 I_1 の影響 初段のアーク電流 I_1 の値が電極消耗に与える影響を調べるために、第 2 段のアーク電流 I_2 と初段および第 2 段のアーク時間 τ_1, τ_2 などの諸因子を一定とし、 I_1 のみを変化して M_W, M_E および γ を測定した。

(1) τ が 50 μ s の場合 アーク時間 τ が十分長いときは単なる方形波でも低消耗放電加工が容易であるが、時間幅が短くなるに従い工具電極の消耗割合が大きくなって、その結果、 γ が増大する。ゆえにアーク時間が比較的小きく、 γ の値の比較的大きい時間 50 μ s において実験を行なった。

図 3 は I_2 を 15.5A、 τ_1 を 10 μ s、 τ_2 を 40 μ s としたときの I_1 と M_W, M_E, γ との関係を示すものである。図中 I_1 が 15.5A のところは I_1 と I_2 が等しい

図 3 I_1 の影響

Fig. 3. Effect of I_1 .

から、アーク時間が 50 μ s の単なる方形波の場合に該当する。図より明らかなように、 M_W は I_1 の増加、すなわちギャップ投入エネルギーの増加とともにしだいに上昇するが、その変化の程度はそれほど大きくない。それに対し M_E は図示のように I_1 の影響を大きく受け、 I_1 が 6A 付近で最小になることがわかった。

すなわち、 I_1 の変化は M_W にそれほど影響を及ぼさないが、 M_E の値は I_1 に非常に敏感に左右されることが明らかになった。従って、 γ はほぼ M_E に対応した変化をし、 I_1 が約 6A で最小の 1.3% になり、単なる方形波の場合の 3.8% の約 1/3 と格段に低下し、階段波の効果は最大になり最も良い低消耗条件になる。

放電加工では、パルス電流波形の立上り時間を長くすると、 M_E および γ が低下することは知られており⁽⁶⁾⁽¹²⁾、本実験においても、 I_1 が I_2 より低いときは、階段状波形の採用は実質的には方形波のパルス電流において立上りを鈍くしたことに相当する。放電開始の直後は電極点の電流密度が高いので、陰極点よりの電子放出が盛んであり、従ってこの場合ギャップ電力は陽極 (工具電極) に片寄る傾向にあるので⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、放電の初期の電流を低く抑えると、工具電極の消耗を軽減できる⁽¹⁵⁾。反対に放電初期に高電流パルスを方形波電流に重畳すると、 M_E および γ は異常に増加する⁽¹⁶⁾。

なお、図の I_1 が 6A 以下になると M_E 、従って γ が増加するのは余り I_1 が小さいと反復放電が不安定化して、電極間に短絡をひん発する結果に基づくものと考えられる。低消耗放電加工のためにパルス電流の立上りをゆるやかにするのも一方法であるが、これでは比較的低電流の放電加工では、繰返し放電が不安定になる欠点がある。また、電気回路の観点よりしても、トランジスタ式の回路にインダクタンスを接続して

図 4 I_1 の影響Fig. 4. Effect of I_1 . 図 5 γ に対する階段状パルス電流の効果Fig. 5. Effect of the stepformed pulse current for γ .

立上りをゆるやかにするとオン・オフ時の誘起電圧によってトランジスタが破損し、トランジスタのベース電流を加減して波形をなまらせると、トランジスタのコレクタ損失増大のためトランジスタが破損する恐れがある。

図 4 は図 3 に比べて τ_1 の値を $20\mu\text{s}$ にしたときの同様な関係を示すものである。但し、 τ は $50\mu\text{s}$ で図と同じである。 γ を低下させる階段状パルスの効果は前図の場合と全く同様であり、 I_1 が 6A 付近では γ は単なる方形波のときに比べて格段に低下し、約 $1/4$ 程度の 0.9% になる。但し、 τ_1 の増加による 1 回の放電エネルギーが減少するので、 M_w もかなり減少する。このほか τ_1 が $5, 15, 25\mu\text{s}$ の場合 (いずれも $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 50\mu\text{s}$) についても同様な実験を行ない、 γ だけについてまとめたのが図 5 である。図のいずれの場合も図 3、第 4 図と似た傾向となり、2 段の階段状パルスは γ の低下に非常に有効である。

次に、 I_2 を 23A に増やし、かつ τ_1 を $10\mu\text{s}$ と $20\mu\text{s}$ について同様な実験をして得られたのが図 6 と図 7 で

図 6 I_1 の影響Fig. 6. Effect of I_1 . 図 7 I_1 の影響Fig. 7. Effect of I_1 .

ある。 I_2 の増加により M_w は全体的に増大したが、工具電極の消耗がそれを上まわる上昇率になるので、 γ は I_2 が 15.5A のときより全体的に大きくなる。しかし階段状パルスの効果はここでも顕著に現われ、 I_1 が 9A 付近では、 γ は単なる方形波のとき (14.0%) に比べると、 τ_1 が $10\mu\text{s}$ の図 6 で $1/2$ 、 τ_1 が $20\mu\text{s}$ の図 7 では $1/6$ 程度にも減少する。階段状パルスの採用により方形波パルスに比べて低消耗放電加工が可能なことは明白である。

(2) τ が $50\mu\text{s}$ 以外の場合 一般的に低消耗放電加工の条件は、放電電流/放電時間の値を小さくすることにある。よって、 I_2 を増やすとともに、 τ を $50\mu\text{s}$ より $100\mu\text{s}$ にして同様な実験をした結果を図 8 と図 9 に示した。この場合も階段状パルス電流の採用は γ の低下に非常に効果があり、単なる方形波の場合と比較すると、 I_2 が 23A の図 8 では 2.8% が I_1 が 9A のとき 0.6% に、 I_2 が 30A の図 9 では 8.4% が I_1 が 12A のとき 2.7% となっており、図のように除去速度の減少を 10% 以内に抑えつつ、 γ を格段に低

図 8 I_1 の影響Fig. 8. Effect of I_1 . 図 9 I_1 の影響Fig. 9. Effect of I_1 .

下させることに成功した。また、これらの結果より γ を最小にする I_1 の値は I_2 の約 40% になることが判明した。

低消耗放電加工は周知のように、低電流、長アーク時間放電の反復を特徴とするので、 τ を短くするに従い γ が増大して低消耗が得られなくなることは避けられない。前項の実験は τ が $50\mu\text{s}$ であるが、 τ を短くして $40\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ としたときの方形波と階段波を比較したのが図 10 である。図中 I_1/I_2 が 1 のところは方形波、0.4 のところは階段波の場合である。図より明らかのように、ここでも 2 段の階段状パルスの効果は大なるものがあり、 γ の値は単なる方形波の場合の 1/2 以下になった。但し、 γ がこの程度の値になってくると、もはや低消耗放電加工とは言い難い領域に入ってくる。

更に、 τ が短い $10\mu\text{s}$ 程度の放電加工では、低消耗

図 10 τ と γ の関係Fig. 10. Relation between τ and γ .

条件が破れて γ は数十%にも達し⁽⁷⁾、低消耗放電加工の範囲を逸脱して有消耗放電加工の領域に入る。 τ が $1\mu\text{s}$ 程度では、もちろん有消耗放電加工の領域であることは言うまでもないが、 M_w と γ の値を考慮すると、極性を反転して工具電極が負、被加工体が正の正極性加工にする方が有利になってくる⁽¹⁷⁾。 τ が短くなると γ が増大するのは、低消耗の主要な要因になる工具電極表面における黒化層の形成と被加工体(陰極)より工具電極(陽極)へと電極材料の移転⁽¹⁾が困難になることに基因するものと推定される。

以上の結果より本実験範囲内においては、 I_1 を I_2 の約 40% 程度とすると、単なる方形波の場合と比較して γ が格段に低下することが判明した。

〈3・2〉 初段のパルス幅 τ_1 の影響 階段状パルスにおける I_1 、 I_2 、 τ および T を一定としても、 τ_1 を変えると電極消耗は当然影響を受ける。前節の〈3・1〉節では τ_1 を固定して I_1 の影響について述べたが、 I_1 を固定して τ_1 を変えた場合の結果を整理して図 11 に示した。図は I_1 が 6A、 I_2 が 15.5A、 τ が $50\mu\text{s}$ のもとでの τ_1 と M_w 、 M_E 、 γ との関係を与えるものである。 I_1 を 6A としたのは図 3、図 4 より I_1 が 6A 付近で γ に対する階段波の効果が最大になるからである。 M_w と M_E は τ_1 の増加、すなわちギャップ投入エネルギーの減少とともに図示のように下降する。一方、 γ も τ_1 の増加とともに低下し、 τ_1 が $10\mu\text{s}$ 以降ではほぼ一定となった。図中 τ_1 が 0 のところは τ_2 が $50\mu\text{s}$ 、すなわちアーク電流が 15.5A のときの単なる方形波の場合である。 γ の値がほぼ同じであるときは、放電加工の観点からすると、 M_w が大なるほど好ましいから、上述の加工条件では τ_1 を $10\mu\text{s}$ 程度にして加工するのが適当であると判定される。

I_1 、 I_2 、 τ を増やした同様な結果を図 12 に示した。 I_1

図 11 τ_1 の影響Fig. 11. Effect of τ_1 . 図 12 τ_1 の影響Fig. 12. Effect of τ_1 .

値を 9 A としたのは前述のように、 I_2 の約 40% が好ましいからである。図より M_W , M_E と γ は前図と同様な傾向となり、 γ が低下して一定となる付近は約 20 μ s である。

これらの結果より除去速度を大きくするために、 I_2 と τ を増加した場合、それに応じて I_1 と τ_1 を増せばよいことがわかった。この場合、 τ_1 を τ の約 20% 程度とすると、除去速度をそれほど低下させることなく、低消耗放電加工が実現できることが明らかになった。

以上、要するに低消耗放電加工において、 τ の比較的短い加工条件では、筆者らの提唱する 2 段の階段状パルスを採用すると、格段に γ を低下させることが可能となり、特に I_1 を I_2 の約 40% 程度、 τ_1 を τ の約 20% 程度に選定すると、 M_W をそれほど低下することなく、 γ を格段と軽減できることが明らかになった。

なお、加工面あらさについては、 τ が同じの場合、

面あらさは電流波形の影響をほとんど受けず⁽⁵⁾⁽⁷⁾、特に本研究では 2 段の階段状パルスの電流は、比較している方形波パルスの電流より高くしていないから、加工面あらさは方形波の場合より悪くなることはない。一例をあげると、アーク時間 50 μ s、アーク電流 15.5 A の方形波の加工面あらさは 13 μ m R_{max} 、 I_1 が 6 A、 τ_1 が 10 μ s、 I_2 が 15.5 A、 τ_2 が 40 μ s の階段波の加工面あらさは 11 μ m R_{max} となる。

また、パルス電流波形の変化は、多数の階段にわたって順次階段状に変化⁽⁵⁾⁽⁷⁾させるのではなく、わずか 2 段の階段波であるので、本方式では電気回路の構成が極めて簡単になる特徴がある。ゆえに、従来より重要課題となっていた、放電時間の短い加工条件における低消耗放電加工の技術分野について、2 段の階段波パルスを採用することは、方形波パルスに比べて面あらさを悪くすることなく、しかも簡単な回路構成で格段の低消耗化が可能となり、実用面における実施効果は大なるものがある。

4. 過渡アーク放電特性の検討

放電加工では、液体中の微小ギャップに過渡アーク放電を反復することを特徴としているので、このような条件のもとにおける過渡アークの特性を知ることが放電加工の基礎的現象の解明に対しても極めて重要である。

図 1 の回路により階段状の電流波形を持った過渡アークを反復したときの、放電ギャップの電圧波形と電流波形を同時観測し、その一例を図 13 に示した。図は I_1 が 9 A、 τ_1 が 30 μ s、 I_2 が 23 A、 τ_2 が 70 μ s の放電条件である。初段パルス電流の立上り時間約 1.5 μ s、9 A より 23 A に増加するときの立上り時間約 2.5 μ s、23 A より消弧に至る時の下降時間約 2 μ s である。また放電中のアーク電圧は 20~30 V の範囲内にあり、その電圧波形には金属電極特有のかかりの脈動成分を含む。図より第 2 段の電流が立上る点において

図 13 電圧波形および電流波形

Fig. 13. Waveforms of gap voltage and arc current.

図 14 過渡アークの動的な特性

Fig. 14. Dynamic characteristic of transient arc.

電圧波形がやや上昇しているのがわかる。

図 14 は前図と同一条件のもとで、オシロスコープの X-Y 操作により、電圧-電流特性を観測した結果を示すもので、アーク電流が時刻 30 μ s で 9A から 23A へと増加すると、アーク電圧もやや増加するのがわかる。この関係より急しゅんな電流変化に対するアーク電圧について検討する。

いま、アーク電圧を V_a とすると

$$V_0 = V_a + V_c + IR \dots\dots\dots (1)$$

但し、 V_a : 陽極降下, V_c : 陰極降下, I : アーク電流, R : 陽光柱の抵抗, IR : 陽光柱の電圧降下

で与えられる。

図 13, 図 14 の t_1 における電圧変化分は、点弧後の電流 9~23A の変化に対して約 4~8V である。放電加工ではこのように電流の急しゅんな変化に対しても比較的アーク電圧の変化は少ない。

他の報告で示したが⁽¹⁸⁾、本実験類似の過渡アークにおいて、 I が 9~23A の変化では、陽光柱降下の変化分は約 0.4V である。これを採用すると(1)式から $V_a + V_c \approx 3.6 \sim 7.6V$ である。この変化なども電極消耗に関連のある電極点入力に影響してくるであろう。他の報告より⁽¹⁸⁾、本実験条件における陽光柱の電界強度の変化分を類推すると約 200V/cm~110V/cm の変化となり、値としてはかなり高いものである。これら V_a , V_c , IR の総合的变化が図 14 の傾斜となって現われているのであり、ほぼ直線の変化を示している。

次に電極材料の溶融飛散微粒子や液の炭化微粒子、いわゆる加工くずが加工液に混入してくるので反復放電における放電休止期のギャップ抵抗も、放電加工中一定の値ではなく放電のたびに絶えず変化していることが予想される。放電休止期におけるギャップ抵抗の動的な変化状態を知ることは、ギャップ現象の解明の点において興味あることである。そのために、図1の右半分の測定回路を考え、放電休止期におけるギャッ

図 15 ギャップ抵抗の動的変化

Fig. 15. Dynamic behaviour of gap resistance.

プ抵抗の動的変化状態を求めた結果を図 15 に示した⁽¹⁹⁾。図 1 における補助電源の電圧 V_0 は過渡アークの電圧が 20~30V 程度であることに着目し、それより低い 10V に設定してある。こうするとギャップにアークが発生中は抵抗 R_0 には電流が流れず、アークが消弧した放電休止期になると、補助電源より R_0 を通ってギャップに電流が流れるので、過渡アーク放電を繰り返しながら R_0 の電圧をオシロスコープによって観測すると、ギャップ抵抗 R_G の動的な変化がわかる。

本回路におけるギャップ抵抗 R_G は次式で与えられる。

$$R_G = R_0(V_0 - V)/V \dots\dots\dots (2)$$

但し、 R_0 の値は 100 Ω であり、 V は R_0 の電圧である。

図 15 は上記の方法によって前と同一の放電条件でもって R_0 の電圧を観測したもので、図より(2)式を使ってギャップ抵抗 R_G を求めると大体 90~400 Ω の範囲内にあり、ギャップ抵抗が放電のたびに、動的に変化している状態が明らかになった。すなわち、放電一発一発の間における R_G の個々の値が図よりわかりそれらの値は加工液に絶縁液を用いているにもかかわらずかなり低い。更に図では 1 回は加工くずによってギャップが橋絡され(A点)、1 回は橋絡しなかったこと(B点)が判定できる。

このようにして、図の波形より短絡、開放などの放電ギャップの物理状態を知ることができ、見掛け上、安定に反復放電を継続しているようでも、繰り返し放電中にギャップに橋絡現象を頻発していることがわかった。2 段の階段状パルスでなく、方形波パルスの場合でも、本方法によりギャップ状態を検出できることはもちろんであり、 R_0 の平均電圧を工具電極の自動制御に対するセンサにすることもできる。

5. む す び

白灯油中において、銅を工具電極として被加工体の

SK 4 焼入鋼との間に、2 段の階段状パルスの過渡アーク放電を繰返し、比較的アーク時間の短い加工条件での低消耗放電加工を行なった。成果を要約すると次のとおりである。

(1) 2 段の階段状パルスを採用し、初段パルスの電流を第 2 段の電流の約 40% 程度、初段のパルス幅を全体のパルス幅の約 20% 程度に選定すると、方形波パルスの場合に比べて、除去速度をそれほど低下させることなく、電極消耗比を格段に軽減させることができた。

(2) 階段状パルスによる放電加工では、ステップ状電流値変化に対してアーク電圧が変化する。陽光柱の電界強度は約 200 V/cm に達することも類推され、かなり高い値となる。また反復放電における放電休止期のギャップ抵抗が放電のたびに動的に変化している状態を明らかにし、絶縁性液体を加工液に用いているにもかかわらず、その値が加工くずの存在のためかなり低く、数十ないし数百 Ω のオーダーになることを示した。

本研究の検討には、同志社大学工学部 藤田一郎助教授および米子工業高等専門学校 橋口清人教授の協力を得た。付記して謝意を表す。

(昭和 55 年 8 月 20 日受付, 同 56 年 4 月 16 日再受付)

文 献

- (1) 元木・李・倉田:「トランジスタ式放電加工の基礎的研究」, 電学誌 88, 489 (昭 43-3)
- (2) 元木・寄神:「サイリスタを用いた低消耗放電加工用電源方式」, 電学論 B 93, 264 (昭 48-6)
- (3) 奥野・三谷・奥村:「放電加工方法」, 特許公報昭 40-517
- (4) 木本・田宮・平田:「銅電極による電極低消耗の放電加工」, 精密機械 33, 379 (昭 42-6)
- (5) 小林・大泉:「電流波形制御(特殊電流波形)による加工特性」, 電気加工学会誌, 8, 16, 20 (昭 50-3)
- (6) H. E. De Bruyn: "Slope control: A great Improvement in Spark Erosion", *Annals CIRP*, 16, 183 (1968)
- (7) C. J. Feeney & J. R. Crookall: "The Effectiveness of Non-Rectangular Current-Pulse Forms in Electro-Discharge Machining". *Proc. 19th MTDR Conference*, 551 (1978)
- (8) 元木・猪飼:「液中過渡アーク放電の電極消耗 (第 28 報)」, 昭 51 電気関係学会関西支部連大 G44
- (9) 元木・猪飼:「液中過渡アーク放電の電極消耗 (第 29 報)」, 昭 52 電気関係学会関西支部連大 G2
- (10) 元木・猪飼:「液中過渡アーク放電の電極消耗 (第 30 報)」, 昭 53 電気学会全大 No. 61
- (11) 元木・猪飼:「階段状パルス電流波形による低消耗放電加工」, 電気加工学会第 90 回研究会資料, 1 (昭 53-7)
- (12) 元木・李・中島:「トランジスタ式放電加工(第 7 報)」, 昭 43 精機学会秋季大会 No. 222
- (13) M. Motoki & K. Hashiguchi: "Energy Distribution at the Gap in Electric Discharge Machining". *Annals CIRP*, 14, 485 (1967)
- (14) F. Van Dijk, et al.: "Some Results of Physical Research in EDM". *Proc. ISEM*, 4, 68 (1974)
- (15) 元木・猪飼:「放電加工の電極消耗一重畳および追加パルスの影響一」, 電気加工学会誌 10, 19, 24 (昭 51-9)
- (16) 元木・李・中島:「液中過渡アーク放電の電極消耗一パルス重畳効果一」, 電気加工学会誌 2, 3, 48 (昭 43-9)
- (17) 倉藤・増沢:「超硬合金の放電による微細加工」, 電気加工学会誌 2, 3, 1 (昭 43-9)
- (18) 元木・上出:「低消耗放電加工における陽光柱の電界強度と電流密度」, 電学論 A 100, 271 (昭 55-5)
- (19) 元木・寄神:「放電加工の異常対策」, 昭 45 精機学会関西地方講演会 No. 105