

T法(1)による細穴放電加工の除去量の予測*

和合 健**, 飯村 崇**, 黒澤 裕也***

IMY 連携会議「自動車部材関連における超精密加工技術」において岩手県は放電加工による微細穴加工の高度化に取り組んでいる。ここでは、 $\phi 0.1\text{mm}$ 程度の微細電極を使用した細穴放電加工を例に取り上げ、T法(1)によりエネルギーから放電加工量を定量的に予測する時の予測精度を検証した結果、高い予測精度が得られた。

キーワード：細穴放電加工，T法(1)，エネルギー，精度検証，定量評価，非線形

Estimation of Removal Quantity on Electric Discharge Machining of a Minute Hole by T method (1)

WAGO Takeshi, IIMURA Takashi, KUROSAWA Yuya

A minute hole processing by electric discharge machining was performed as Iwate Prefecture's main theme in IMY cooperation meeting on "ultra-precision machining technology of automobile manufacture". In this below, removal quantity of diameter $\phi 0.1\text{mm}$ minute hole by electrical discharge machining was estimated from used energy values by T method(1). As a result, it was found that high accuracy estimation was performed by the method.

key words : Minute hole EDM, T method(1), energy, verify of accuracy, evaluation of determination, non-liner

1 緒言

放電加工は、金型製造におけるマザー加工の位置付けにあり、加工ノウハウを蓄積して対処することによりサブミクロンを追求できる高精度加工が実現できる。従来のエネルギーの評価方法は、仕事に使用されるエネルギーの最大値、最小値、ばらつき等による相対値で評価されていたが、エネルギーから放電加工結果を定量的に評価するためにはエネルギーと放電加工結果が高い相関を持ち、両者の関係が1対1で関連付けることができるかを検証する必要がある。そこで、T法(1)を適用して放電加工に適した単位空間、信号空間へのメンバー（実験番号列）の配置を見つけ出すことによりエネルギーから放電加工結果を定量的に高精度予測する手法の構築に取り組んだ。

2 放電加工技術の評価

切削加工の場合は、入力をエネルギーとして出力を除去量とした場合、SN比が高く感度が大きい条件が適正な切削現象が為されていると定義できる。対して放電加工

工では、多数設定値の組み合わせで入力エネルギーの大きさや性質が決定されるため切削加工と同様な線形式の入出力関係が定義できるとは限らない。放電加工の入出力関係は図1に示す想像図のとおり、入力を加工エネルギー、出力を除去量とした場合に非線形の関係であると予想される。以上を踏まえ、ここでエネルギーから放電加工結果を定量的に予測する場合の放電加工の入出力関係は、非線形ではあるが1対1で定まる関係であり、SN

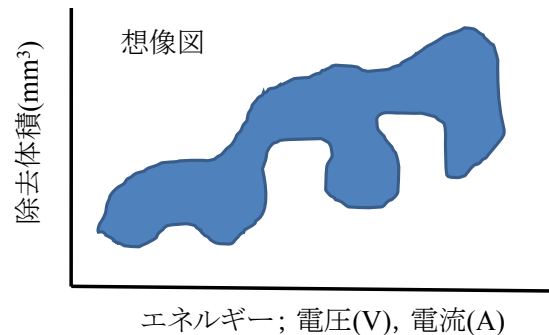


図1 エネルギーと除去体積の関係

* IMY 連携会議「自動車部材関連における超精密加工技術」Gr

** 材料技術部

*** 岩手大学工学部機械工学科先端加工研究室

比が高い関係で良い放電加工が行われると考えられる。T法(1)は項目毎に独立して単位空間と信号データからSN比と感度が算出できる¹⁾ため非線形の評価が行える。ここでの入出力関係は式(1)に基づき、除去体積を信号 \hat{M}_i 、電圧と電流の波形 y_{ki} を出力とした。

$$\hat{M}_i = \frac{\eta_1 \times \frac{y_{1i}}{\beta_1} + \eta_2 \times \frac{y_{2i}}{\beta_2} + \eta_3 \times \frac{y_{3i}}{\beta_3} + \dots + \eta_k \times \frac{y_{ki}}{\beta_k}}{\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_k} \quad (1)$$

ここで、 \hat{M}_i は予測真値(mm³)、 η_k はSN比(db)、 β_k は比例定数、 k は項目数、 i は信号数、 y_{ki} は未知データ(V, A)である。

3 実験装置及び方法

3-1 実験装置

放電加工機は三菱電機製 EDSCAN8E を用いた。電極はφ0.1mmの銅パイプを使用し、加工材にSKH51相当品である竹内型材研究所製 THF51 を使用した。電極の主軸への保持治具は、φ0.05mm~φ0.3mmが保持できる菱電工機製 RCH-03LA を使用した。電流測定子は日置電機製 3274 を用いた。この電流測定子は、DC~10MHzの周波数帯域を持ち、放電による高周波領域の測定に適用できる。放電は高速現象であるため通常の測定ではデジタルオシロスコープが使用されるが、ここではA/D変換器(NI製 USB-5133)を使用した。このA/D変換器は100MS/sの高速抽出の性能を有することから、プログラム言語NI製LabVIEW8.5の制御によりA/D変換器を経由して電圧と電流を直接パソコンに取り込むことでT法の演算を有効に活用できる。

3-2 予備実験

予備実験は、放電加工に影響を与える6種類の制御因子を設定して30分間の細穴放電加工を行い、加工結果として穴径と穴深さを取得した。共通の加工条件は、パイプ中心から加工液噴出、振れ抑制案内の高さを50μmとした。また、開始5分後の加工中の極間電圧と入力電流の波形を測定した。表1に示したA~Fの6種類の制御因子を直交表L₁₈に配置した。ここでの直交表L₁₈の使用目的は、パラメータ設計における交互作用を交絡させるためではなく、単に因子のランダムな組み合わせを得るために使用した。誤差因子は、ランダムな制御因子の組み合わせにおいて自動的に組み込まれていると判断し個別に設定しなかった。図2に放電加工結果、図3に1パルスの電圧波形、図4に1パルスの電流波形を示す。二つの図中の番号3が信号データとした良好な結果の波形、番号15が単位空間とした平均的な波形であり図中に強調して示した。

表1 因子と水準

因子	水準		
	1	2	3
A μSF回路 (M111)	ON	OFF	-
B コンデンサ回路 (M113)	ON	OFF	ON
C 電圧LOW設定 (M115)	ON	OFF	ON
D 回転速度 (r/min)	100	200	400
E 電気条件 (Eパック)	E855	E1951	E1952
F 揺動半径 (μm)	50	55	60

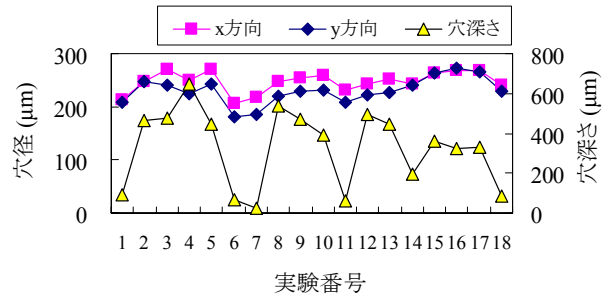


図2 予備実験での放電加工結果

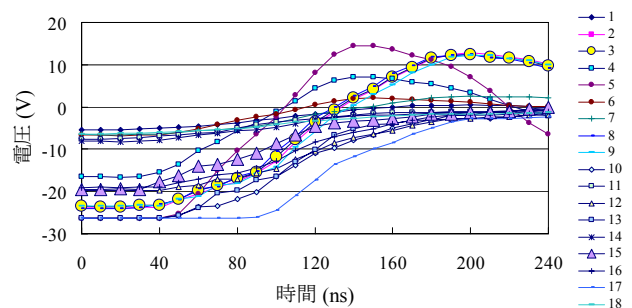


図3 1パルスの電圧波形

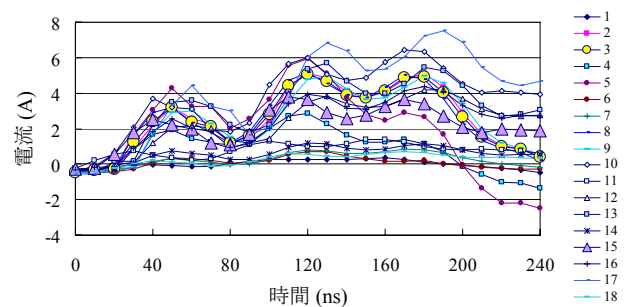


図4 1パルスの電流波形

(1) 信号データを両端に設定した場合の予測真値の算出

直交表L₁₈を使用してランダムな因子の組み合わせによる単位空間と信号データを作成するための予備実験を行った。除去量は体積(mm³)として計算することとして図2の穴径と穴深さから除去体積を算出した。T法(1)では出力値が中位にあり、できるだけ均質で数の多いところから単位空間のメンバーを選択する。図5から除去

体積が 0.02mm^3 付近に集中していることが分かる。したがって、本研究では、実験番号 10, 13, 15 を単位空間のメンバーとして選択した。信号データは、T法(1)では良好な集団と劣悪な集団の両端を選択することから除去体積が大きい実験番号 2, 3 と除去体積が小さい実験番号 6, 11 を設定した。この信号データの設定方法を以下で“信号データ (両端)”と表現する。未知データは、単位空間と信号データの設定値を除いた全 11 個の電圧及び電流波形を用いた。項目は電圧及び電流波形が立ち上がった瞬間の値から連続的にそれぞれ 25 個抜き出し、計 50 項目とした。図 6 に予測値と実測値の比較を示した。信号データを両端にする場合、式(1)の予測真値は単位空間からのベクトル量で示され大きさと方向を合わせもっているため単位空間の真値に予測真値を単純加算すれば良い。信号データを両端に設定した場合は、予測値と実測値はそれぞれの波形の平均値が一致しているが両端の精度は悪い。本実験の目的はパラメータ設計の評価指標として使用するための精度検証であり、良好な実測値を精度良く予測することが重要であり劣悪な実測値の予測精度の低さは無視しても良い。

(2) 信号データを良好な集団のみに設定した場合の予測真値の算出

次に、単位空間はそのままにして信号データを良好な集団のみに設定した。信号データは除去体積が大きい実験番号 3, 4, 5 である。未知データは、単位空間と信号データの設定値を除いた全 12 個の電圧及び電流波形を用いた。信号データに良好な集団のみに設定する場合は、予測真値 \hat{M}_i は単位空間からのスカラー量で示され加減算の方向は示されない。そのため加減算の方向を判断する指標が必要になる。以下に加減算の判断指標を説明する。図 3 と図 4 の電圧、電流波形を観察すると除去体積が大きい波形は波形の山谷の差が大きい傾向が見られた。そこで加減算の判断指標を電圧及び電流波形の山谷の最大差(以下、電圧 PV 及び電流 PV という)とし、式(2)から予測除去体積を算出する。

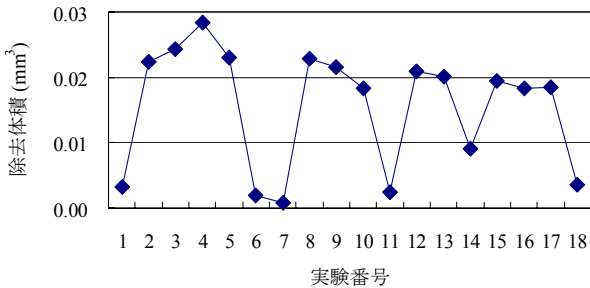


図 5 除去体積

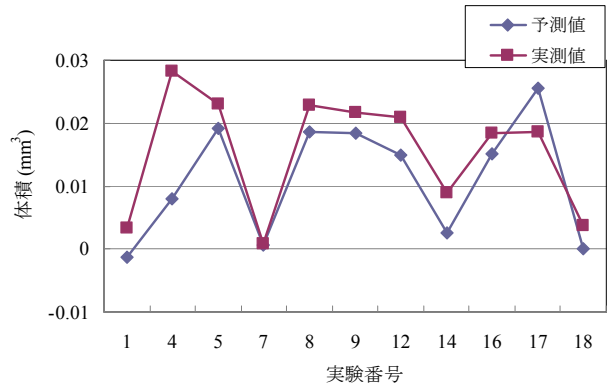


図 6 予備実験での信号データ (両端) の予測値と実測値

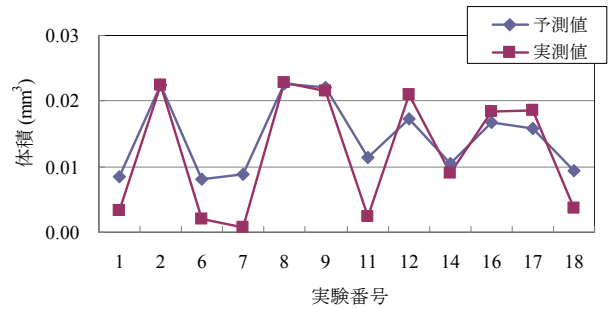


図 7 予備実験での信号データ (良好のみ, 電圧 PV) の予測値と実測値

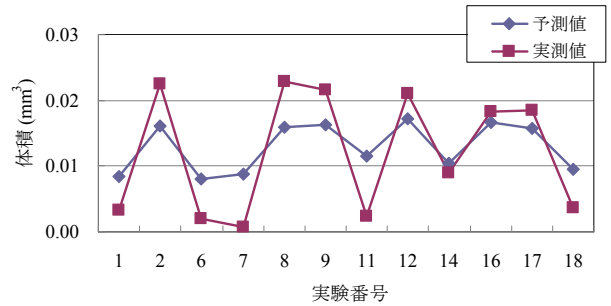


図 8 予備実験での信号データ (良好のみ, 電流 PV) の予測値と実測値

$$\begin{cases} Vol_{est} = a + b & (PV_{samp} > PV_{base}) \\ Vol_{est} = a - b & (PV_{samp} < PV_{base}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 Vol_{est} は予測除去体積(mm^3)、 a は単位空間の真値(mm^3)、 b は予測真値(mm^3)、 PV_{samp} は未知データの電圧 PV(V)または電流 PV(A)、 PV_{base} は単位空間の電圧 PV(V)または電流 PV(A)である。この信号データの設定方法を以下で“信号データ (良好のみ, 電圧 PV)”, “信号データ (良好のみ, 電流 PV)”と表現する。図 7 に信号データ (良好のみ, 電圧 PV) の予測値と実測値の比

較, 図8に信号データ(良好のみ, 電流 PV)の予測値と実測値の比較を示す。信号データ(良好のみ, 電圧 PV)の場合は, 除去体積の大きな集団の予測精度が高いが除去体積の小さい集団の予測精度が低いことがわかる。一方, 信号データ(良好のみ, 電流 PV)の場合は, 実験番号2, 8, 9の3カ所で加減算の方向が間違っている。これは, 入力電流が小さい場合でそれに倣って必ずしも除去体積が小さくなるとは限らないことを示しており, 電流波形の山谷の最大差は加減算の判断指標には適さない。

(3) 項目診断

図9(a)に代表例として実験番号3の電圧及び電流波形を示し, 図9(b)に信号データを良好な集団のみとした時の電圧波形の項目診断図, 図9(c)に信号データを良好な集団のみとした時の電流波形の項目診断図を示した。ここでの項目診断は, 1; その項目を使用する, 2; その項目を使用しない, と設定したため左上がりりでその項目を有意と判定する。図9(b)の電圧では波形の初期と後期で有意を示しており, 図9(c)の電流では波形状を示す波形に対応して周期的に有意を示している。この結果, 電流の波形は位相から大きく影響を受けるので予測精度の信頼性が低く, 電圧は連続的な有意判定が見られるので波形状を精査することで予測精度の向上が期待できる。

4 結 言

φ0.1mm程度の微細電極を使用した細穴放電加工を例に取り上げ, パラメータ設計においてエネルギーを定量的な評価指標に使用するために T 法(1)を適用した時の除去量の予測精度を検証し, 以下の結論が得られた。

- (1) T 法(1)の信号データへのメンバーの配列では除去量の良好な集団と劣悪な集団による両端を設定した場合よりも除去量の良好な集団のみを設定した場合において予測精度が向上した。
- (2) 除去量が良好な集団のみを信号データに設定する場合には, 単位空間の除去量に対して予測真値を加減算する判断指標が必要になるが, 電圧波形の山谷の最大差を使用することで的確に加減算を判断することができた。
- (3) 結論として, エネルギーを使用した除去量の予測で高い精度が得られることがわかったので, 細穴放電加工のパラメータ設計においてエネルギーを使用して定量的に評価できることが示され, 使用者による最適な電気条件の探索に利用できる。

文 献

- 1) 田口玄一: 目的機能と基本機能(6)-T 法による総合予測-, 品質工学, Vol.13, No.3, p5-10(2005)

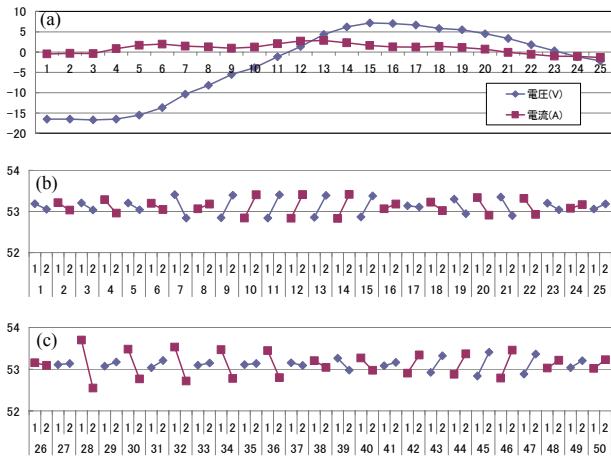


図9 項目診断図