

## 放電加工面の機械的特性の評価法に関する研究

城門由人\*・松田健次\*\*

\*機械電子部・\*\*九州工業大学工学部

## Evaluation of Mechanical Properties on Electrical Discharge Machining Surface

Yukihito KIDO\*・Kenji MATSUDA\*\*

\*Mechanics &amp; Electronics Division・\*\*Kyushu Institute of Technology

## 要旨

放電加工面のようにやや粗い面における機械的特性の評価法について検討した。鏡面に対しては、マイクロビッカース硬さ試験を通して硬さの評価や加工変質層域の把握などが可能であるが、粗い面には対応できない。本研究では、ショア硬度計を改良した衝撃試験機による評価法を実施し、その妥当性について検討した。

## 1. 緒言

金型の作製に際し、工程の一つとして放電加工が利用される。放電加工は、要求される形状に型取られた電極(工具)をワーク(被加工物)に接近させ、その間隙に発生する放電現象によりワークを溶融させながら電極形状をワークへ転写する加工であり、特に、複雑な表面形状の型の作製には不可欠な加工手段である。従来は、放電加工後に熟練者による磨き工程が行われ、仕上げはその工程に左右されてきた。しかし、近年では放電加工技術の進歩から、磨きレスまたは磨き工程の簡略化がはかられており、放電加工面がそのまま利用される場合が増えつつある。このことは加工時間の短縮や熟練者への負担の低減につながる。一方で、これまで磨き工程があったために、放電加工表面の機械的特性は重要視されていなかった。つまり、表面層の加工による影響はそれほど考慮されていなかった。しかし、放電加工が熱エネルギーを利用した加工であることを考慮すれば、加工による表面層への影響は多大と考えられる。

また、放電加工面は研削面や切削面と異なり表面層が非常に粗く、鏡面放電加工以外の加工面に対する一般的な表面硬さ試験を用いた機械的特性の評価は不可能である。例えば、圧子を測定面に押し付け、その圧こん形状から硬さを測定し評価する方法の場合、放電加工面では圧こんを正確に計測できず評価は不可能である。

本研究では、ワーク加工面に及ぼす放電加工の影響を捉えることを目的として、加工層近傍における機械的特性の評価方法について検討した。

## 2. 実験方法

## 2.1. 評価手段の検討

一般的にワーク表面層の加工による影響は、硬さ試験や摩擦摩耗試験あるいは切断面の組織観察などにより評価されているが、機械的特性の評価としては硬さ試験を利用する方法が多く用いられている。表面硬さの測定方法としては、ビッカース硬度計やブリネル硬度計など測定条件に応じた多種多様な計測器具が存在する。ここで、放電加工面の評価という観点から、ビッカース硬さ試験のような圧こん形状から推定する方法ではなく、ハンマの衝撃挙動から推定するショア硬さ試験法を採用した<sup>(1)</sup>。なぜなら、放電加工面は、表面の凹凸が激しいために明瞭な圧こんが残らず、その形状を正確に計測できないからである。

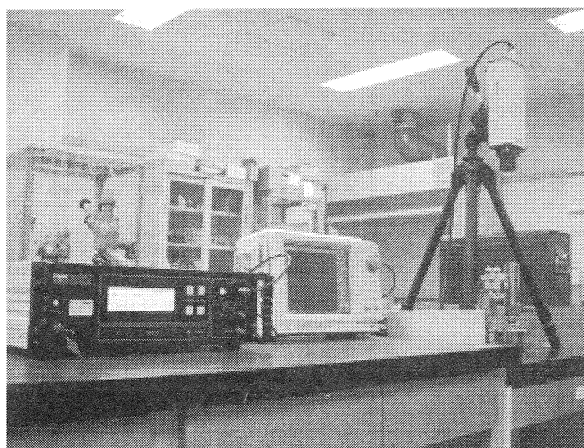


Fig. 1 Picture of experimental apparatus (The Shore hardness tester)

ショア硬さ試験は、代表的な動的硬さ試験であり、一定の重さ・形状のハンマを一定の高さから試験片に落下させた際にはね上がり高さを尺度として硬さを定義するものである。このショア硬さ試験は、試験機が小型、軽量、安価かつ操作法の簡便さから、現場の検査手段として広く普及している。

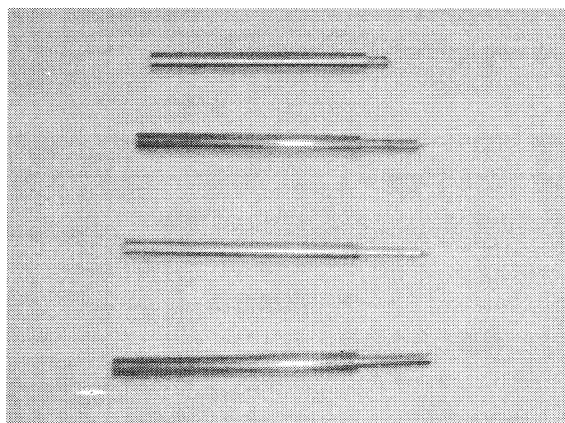


Fig.2 Picture of hammers

## 2.2. 実験方法

Fig.1に、衝撃試験システム(改良型ショア硬さ試験機)の外観写真を示す。使用した試験機は、市販の指示形(D形)ショア硬さ試験機である。ただし、硬度計付属の指示部を除去し、レーザードップラー振動計のレーザーをハンマ上端部に当てることによりハンマの衝撃挙動を測定した。振動計の周波数帯域は1.5MHzであり、100kHzのローパスフィルタを使用しサンプリング速度1MHzで計測した。

試験片表面近傍の衝撃挙動をとらえやすくするために、質量、先端形状の異なる4種類のハンマを使用した<sup>2)</sup>。各ハンマの詳細をTable 1に、写真をFig.2に示す。ショア硬さ試験に使用するハンマは、日本工業規格(JIS B 7727)に質量  $m$  は約36.2g、先端のダイヤモンドチップ圧子の半径  $R$  は約1mm、ハンマ落下高さ  $h_0$  は約19mmと記載されているが、使用したハンマの実測値はやや異なった。ハンマAおよびBの圧子には、ボールペン先端の球を、ハンマCには、市販のセラミックボールベアリング(窒化珪素)の球(1/16in)をハンマ先端に圧入した。また、作製したハンマA, B, Cの落下高さ  $h$  は、

Table 1 Details of hammers

	Standard Hammer	Hammer A	Hammer B	Hammer C
Material of body	Steel	Steel	Aluminum alloy	Steel
Mass (g), $m$	37.50	40.30	14.37	39.94
Material of indenter	Diamond tip	Stainless steel	Stainless steel	Commercial bearing silicon nitride
Diameter of indenter (mm), $R$	1.00	0.70	0.70	1.59
Young's modulus of indenter (GPa), $E$	965	197	197	315
Poisson's ratio of indenter, $\gamma$	0.2	0.3	0.3	0.25
Dropping height (mm), $h$	19	1.32	1.32	1.32

Table 2 Condition of electric discharge process

	Anvil A	Anvil B	Anvil C
Diameter (mm)	25	25	25
Height (mm)	10	10	10
Electrode	--	Copper (Cu)	Copper (Cu)
Setup of radius of shaking process (mm)	--	500	200
Setup of finishing surface roughness, $R_{max}$ ( $\mu m$ )	--	1	6
Measured surface roughness, $R_a$ ( $\mu m$ )	0.58	0.15	0.97
Measured surface roughness, $R_y$ ( $\mu m$ )	3.15	0.91	5.00

\*MITSUBISHI co. EA-12E (EDCOAT)

\*E.S.P.A.R. Program

\*Anvil A : Non electric discharge process

ハンマ強度を考慮してすべて約 1.32mm とした。

試験片は、直径 25mm、高さ 10mm の S50C の両面を研削加工し、試験面に対し銅電極による放電加工を施した。比較のために、放電加工を施さない研削面だけの試験片も用意した。試験片作製には、三菱電機株式会社製形彫放電加工機 EA-12E (EDCOAT 仕様) を使用した。加工条件を Table 2 に示す。

### 3. 実験結果

#### 3.1. ビッカース硬さ試験による評価

試験片 A, B, C に対してビッカース硬さ試験を行った。試験片 A および B は、面粗さが小さくビッカース硬さ試験による硬さの計測が可能であったが、試験片 C については、表面が非常に粗く計測不能であった。Fig.3 に、ハンマ A, B における荷重とビッカース硬さ (HV) の関係を示す。一般的に、研削面は加工硬化により高い硬さを示す傾向がある。事実、Fig.3 から低荷重での硬さが高荷重の場合に比べ高い値を示していることから理解できる。低荷重側での極端な硬さの上昇は加工硬化による影響を、高荷重側での硬さの収束 (HV250 程度) は試験片

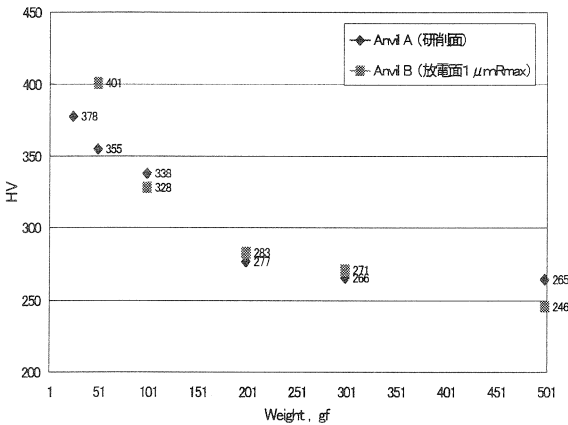


Fig.3 Vickers hardness test

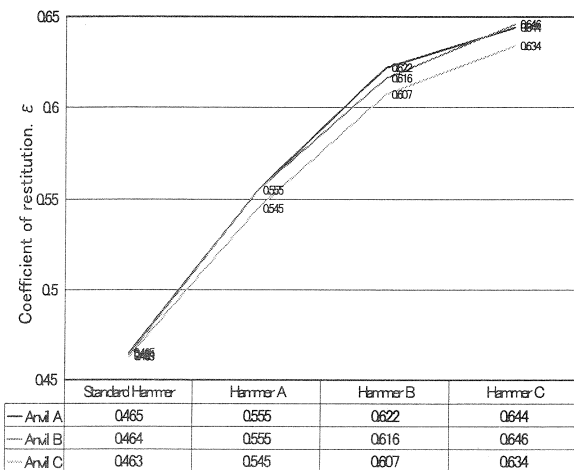


Fig.4 Impact test

母材の硬さを示していると考えられる。放電加工面では、低荷重において研削面より高い硬さを示しており、加工による影響が大きいことが分かる。

このようにビッカース硬さ試験では、計測面粗さが小さい場合において表面層の状態をとらえるのに十分な能力を発揮するが、粗い面に対しては適用できない。

#### 3.2. 衝撃による機械的特性の評価

Fig.4 は、標準ハンマおよび作製した 3 種のハンマによる衝撃試験の結果を示す。評価法としてレーザードップラー振動計により実測される衝突速度  $V_1$  と反発速度  $V_2$  の比により求められる反発係数  $\epsilon$  を用いた。

$$\epsilon = -\frac{V_2}{V_1}$$

反発係数は、衝撃の際にエネルギー損失が全くなければ  $\epsilon=1$  となるが、実際は接触体の変形エネルギーや摩擦エネルギーなどによる損失エネルギーのために  $\epsilon < 1$  となる。Fig.5 に、実測される速度変化を示す。

Fig.4 から標準ハンマでは、衝撃力が強いために表面層よりむしろ母材の影響が現れていると考えられ、試験片による違いは認められない。Anvil A と Anvil B は、各ハンマにおいてほぼ同程度の反発係数を示すが、ハンマ B において試験片による違いが現れ、Anvil A (研削面)、Anvil B (放電面  $1 \mu\text{mRmax}$ )、Anvil C (放電面  $6 \mu\text{mRmax}$ ) の順に高い値を示した。

したがって、ハンマ B による衝撃試験は、マイクロビッカース硬さ試験レベルの表面層近傍での機械的特性の評価が可能である。また、ビッカース硬さ試験で対応不能であった比較的粗い面での評価も可能にした。

## 4. 考察

#### 4.1. 圧こんによる評価

Fig.6 は、標準ハンマおよびハンマ B による試験後の試験片に残る圧こんの断面形状を示す。ここで、ハンマ

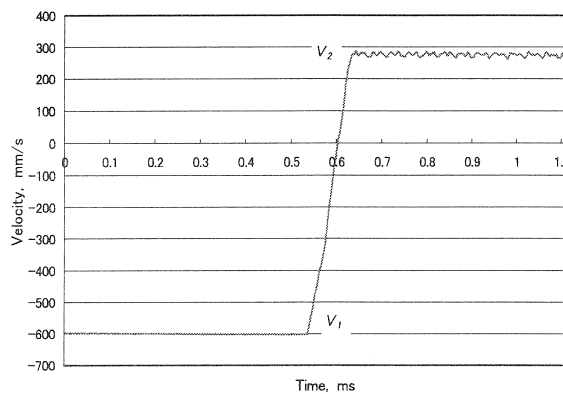
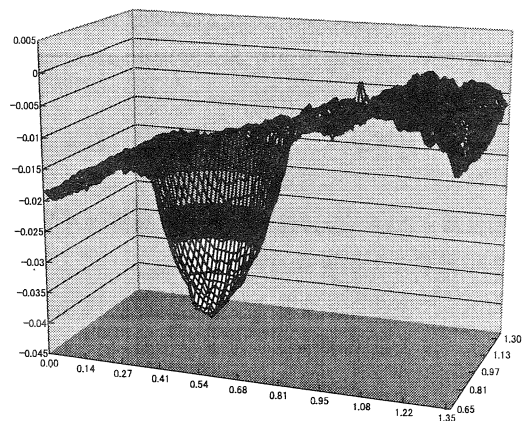
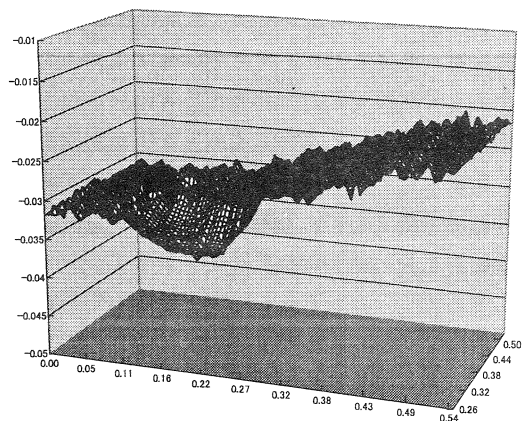


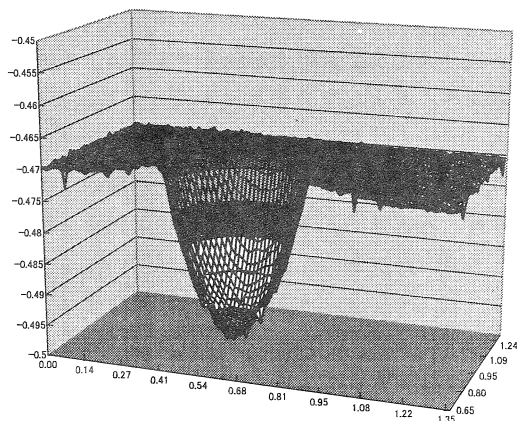
Fig.5 Velocity of the hammer measured using the laser doppler vibrometer, Standard Hammer - Anvil B



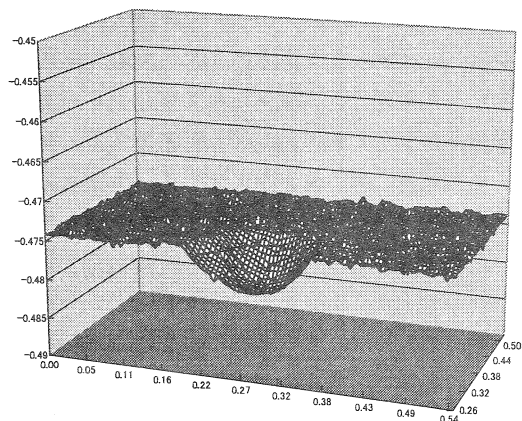
(a) Standard hammer, Anvil A



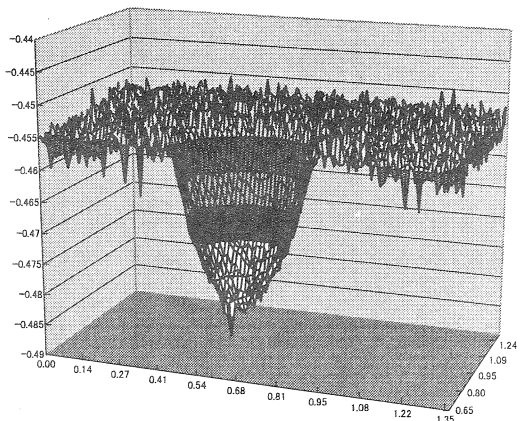
(b) Hammer B, Anvil A



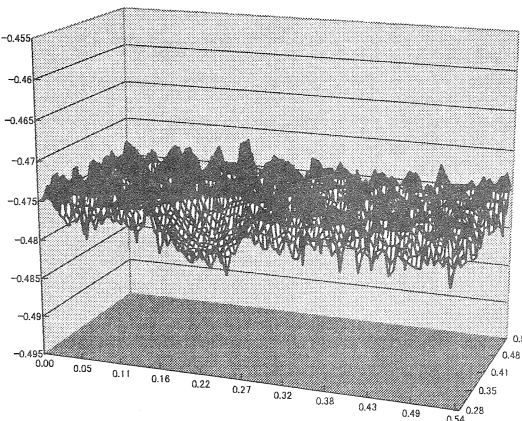
(c) Standard hammer, Anvil B



(d) Hammer B, Anvil B



(e) Standard hammer, Anvil C



(f) Hammer B, Anvil C

Fig.6 Section of dent on anvil

Bは、他ハンマに比べて試験片による相違が大きいことから採用した。標準ハンマによる圧こみは、試験片の表面粗さに比べて明らかに大きく深い。このことからハンマの挙動が試験片表面よりむしろ試験片母材の影響を捉えていると考えられる。このとき、反発係数は試験片の

種類に関係無くほぼ等しい。一方、ハンマBによる圧こみ深さは、標準ハンマの約1/3程度であり、試験片表面近傍での挙動を捉えていると考えることができる。Anvil C (放電面  $6\mu\text{mRmax}$ ) の場合、圧こみ深さは粗さのレベルであり、ハンマ挙動は明らかに加工層域の特性を捉

Table 3 Results of numerical solution

	Standard Hammer	Hammer A	Hammer B	Hammer C
Maximum displacement ( $\mu\text{m}$ ), $\delta$	21.9	11.7	7.8	10.8
Maximum contact force (N), $P$	798	111	60	120
Mean Hertzian pressure (GPa), $P_m$	11.6	8.6	7	10.08

\*Anvil : Young's modulus 206GPa, Poisson's ratio 0.3

えている。

したがって、本実験で行ったハンマ B による衝撃試験は、加工表面層の機械的特性についての確に捉えることが可能である。

#### 4.2. 衝撃挙動の理論的評価

本実験によるハンマの挙動は、ハンマの自由衝撃と考えられる。つまり、ハンマは試験片に対し自由落下で衝突し跳ね返る単純な衝撃挙動である。そこで、この衝撃を球と平面の純粋な衝突と考え、弾性理論<sup>(3)</sup>により理論解を導出する。

ヘルツ接触による最大変位  $\delta$  は、

$$\delta = \left( \frac{5}{4} \cdot \frac{3m}{2\sqrt{R} \cdot E'} \cdot V^2 \right)^{\frac{2}{5}}$$

で導出され、最大接触力  $P$  は、

$$P = \frac{2}{3} \sqrt{R} \cdot E' \cdot \delta^{\frac{3}{2}}$$

となる。このとき、最大ヘルツ圧  $p_{max}$  および平均ヘルツ圧  $p_m$  は、

$$p_{max} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{E'^2 P}{\pi^3 R^2}}$$

$$p_m = \frac{P_{max}}{1.5}$$

により算出される。ここで、等価弾性係数  $E'$  は、

$$\frac{2}{E'} = \frac{1-\gamma_1^2}{E_1} + \frac{1-\gamma_2^2}{E_2}$$

により求まる。

上記の数式を用いて計算した結果を Table 3 に示す。ただし、試験片 (S50C) のヤング率は 206GPa、ポアソン比 0.3 である。

算出した平均ヘルツ圧は、最低のハンマ B でも 7GPa と非常に高压であり、実際に金型や機械部品が受ける圧力に比べれば高い値である。したがって、実用上さらに表層の評価が必要であるが、本試験においてこれまで捉えることのできなかつた層域での評価を十分行えることが明らかである。

## 5. 結言

本実験は、放電加工面のような比較的粗い面の機械的特性の評価方法について検討し、その解析を行った。評価方法として衝撃試験を採用し、ハンマの衝撃挙動（反発係数および圧こん形状）から加工層の機械的特性の評価を試みた。試験機は、一般に普及しているショア硬さ試験機を使用し、表面層の的確な評価が行えるようにハンマを改良した。以下に、本評価法の妥当性について述べる。

1. ハンマ B の使用により、評価面の表層を的確に捉えることができた。
2. 本衝撃評価試験では、ハンマ圧子の形状からピッカース硬さ試験のような微小領域での評価ではなく、やや広範囲での平均的な面の評価となる。したがって、放電加工面のようなやや粗い面に対しても対応可能である。

以上のように、放電加工面のような粗い面に対応できる評価法を確立できた。今後は、本試験法を用いて相対的な評価から絶対的な評価が行えるよう試験方法および試験機の改良を図る予定である。

## 謝辞

最後に、本研究は平成 12 年度先端技術研修事業（平成 13 年 1 月 9 日から平成 13 年 3 月 31 日）において九州工業大学工学部で着手した研究の報告である。研究に協力いただいた九州工業大学工学部兼田楨宏教授、西川宏志助手、村上清人技官、大学院生石井矢寿子さんおよび学部生松村仁君に謝意を表す。

## 参考文献

- (1) 松田健次・兼田楨宏, 有限要素法によるショア硬さの解析, 機論, 66-652, A(2000), 2113-2121.
- (2) K. Matsuda and M. Kaneta, Rebound hardness of electroplated coatings, Elsevier Science B.V., 2000, 163-172.
- (3) S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, Theory of Elasticity, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1970, 420-421.