力の測定における圧電素子の校正*

木 本 保 夫** 田 宮 勝 恒***

Calibration of the Piezo-electric Element in Measuring of Force

Yasuo KIMOTO, Katsunori TAMIYA

In measuring the force by the piezo-electric element, one of the important problems seems to be a calibration of the piezo-electricity or the sensitivity of the measuring apparatus.

This paper deals with the results of calibrations performed by means of the static load and an electrometer tube circuit, and by means of the inertia force due to vibrated weight on the piezo-electric element.

According to above calibration, if the value of the time constant of static calibration circuit is large enough (the authors' case : 2552 sec), the static calibrated value seems to be rather free from serious mistakes compared with the dynamic calibrated value.

1. 緒 言

絶縁性液体中において蓄電器が放電する場合、陽陰極間に瞬滅の過渡的アークが生じて、この放電を直接、間接に金属材料の加工へ盛んに応用するようになってきている。すなわち直接的応用としては片方の電極を被加工体にする放電加工があり、また間接的応用には放電時に発生する衝撃的な液圧の伝播を利用する放電成形（放電プレス）がある。

このような加工法、とくに後者の場合では、被加工体へ短い時間に作用する力の測定、解析が現状では至難な問題である。すなわち力の作用時間は放電時間に関連し、その放電時間は放電回路の定数（ R , L , C ）にもよるが²⁾、 $C=1\sim 50\ \mu\text{F}$ ではおおむね $10\sim 200\ \mu\text{s}$ であるため、力の測定波形の忠実性あるいは測定器の固有振動数の高位性から考えて圧電素子を用いるのが適切なようである。しかし短時間に作用する衝撃的な力の作用点近傍における受圧板の挙動、ならびに受圧板中を伝播して圧電素子に作用する力の関係、つまり衝撃的な入力（力）に対する受圧板の出力（力）の関係が不明であるため、測定系の厳密な校正は困難である。

そこで本稿では、まず圧電素子のみに着目して動的な校正と静的な校正について記述しようと思う。

2. 静的校正

2.1 測定器の構成

* 昭和37年4月精機学会関西支部春季講演会で発表

** 日立造船（株）技術研究所 正会員

*** 日立造船（株）技術研究所

図1 測定器の受圧部分

測定器の受圧部分は前田禎三博士の報告³⁾を参考にして、図1に示す構造のものを用いる。陽極板を兼ねた受圧板の軸方向固有振動数は $136\ \text{kc/s}$ であつて、チタン酸バリウム圧電素子の固有振動数は $530\ \text{kc/s}$ である。したがつて受圧板の固有振動数をとつても、その10%以下の現象周波数⁴⁾である $13\ \text{kc/s}$ を測定可能域の上限にできる。なお、圧電素子の静電容量はおおの $260\ \text{pF}$ で、圧電素子極板間の抵抗値は約 $10^{11}\ \Omega$ である。

2.2 校正用電位計管回路

静荷重で圧電素子の感度校正を行なうためには、圧電素子に生じた圧電荷を失わないことが必要である。

そこで 5654 (6AK5 の高信頼度管) の格子電流を極

力小さくする電位計管回路を用いる。

まず図2に示す格子電位浮動法の格子電流測定回路で⁵⁾、格子電位 V_g と格子電流 I_g を求めると図3のようになる。格子電流 I_g は次式で計算した。

$$I_g = \frac{C(V_g - E_g)}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで $C=12\text{ pF}$ 、 Δt は V_g の変化時間である。

図2 格子電流測定回路

図3 格子電流

図3の結果から $V_g = -0.6 \sim +1.6\text{ V}$ では、格子電流は $8 \times 10^{-15}\text{ A}$ 以下になることがわかる。すなわち入力回路の等価抵抗は約 $10^{13}\text{ }\Omega$ になる。

以上の予備手順から、図4で示す静的校正用電位計管

図4 静的校正回路

回路を用いることにする。

2.3 校正結果

図4の回路で静荷重を圧電素子(受圧板)に加える場合および取去る場合の陽極電流値、ならびに既知の直流負電圧を入力回路へ加える場合の陽極電流値を測定する。両者の測定結果から、陽極電流値を消去して静荷重に対する圧電素子と接続蓄電器²⁾端子電圧を校正する。

図5は荷重と陽極電流値、図6は入力直流負電圧と

図5 静荷重と陽極電流

図6 入力負電圧と陽極電流

陽極電流値の測定結果を示すものである。図5から陽極電流変化 ΔI_p の荷重に対する感度 S_1 は

$$S_1 = \Delta I_p / \Delta F = 1/1.3 \text{ }\mu\text{A/kg} \quad (2)$$

となる。また図6から、入力負電圧に対する陽極電流変化は、

$$S_2 = \Delta I_p / \Delta V_g = 1/0.11 \text{ }\mu\text{A/V} \quad (3)$$

となる。

上記の S_1, S_2 から図7で圧電素子回路の接続蓄電器 $C_1=25,000\text{ pF}$ の場合、測定感度 S は

$$S = S_1/S_2 = 0.0846 \text{ V/kg} \quad (4)$$

になる。

すなわち圧電素子の圧電定数 d_0 は、圧電素

図7 圧電素子の回路

子および接続蓄電器の全静電容量 $C = 25,520 \text{ pF}$ であるから、

$$d_0 = CS = 2.21 \times 10^{-10} \text{ クーロン/N} \quad (5)$$

となる。

したがって、次章で述べる動的校正の場合における接続蓄電器 $C_1' = 5,000 \text{ pF}$ では測定感度 S' は

$$S' = d_0 / (C_0 + C_1') \\ = 0.0399 \text{ V/N} = 0.3925 \text{ V/kg}$$

となる。あるいは 2.56 kg/V である。

3. 動的校正

3.1 校正方法

動電型加振器（明石製作所，ASE-3）の加振台に図1で示した測定器受圧部分を取りつけ、受圧板上に錘を固着する。図8は動電型加振器への装着状態を示すものである。

図7で示すように接続蓄電器 C_1' を用いて、各振動数における圧電電圧 v をシンクロスコープ（岩崎通信機、

図8 動電型加振器による校正

SS 1254 で $R = 10^6 \Omega$ ）に入れ、各振動数で受圧器の圧電素子が受ける最大慣性力と v の最大値 v_m の関係を求める。

3.2 測定結果

図7における接続蓄電器 $C_1' = 5,000 \text{ pF}$ ，入力抵抗 $R = 10^6 \Omega$ したがって測定回路の時定数 CR を 5.52 ms にえらび、圧電素子に加わる全質量 $M = 221 \text{ gr}$ にした場合、 $100 \sim 500 \text{ c.p.s.}$ の振動数における最大慣性力と V_m の関係は図9のようなのである。この場合の振幅 $A_m = 0.175 \text{ mm}$ （一定）である。

図9 振動数を変えた場合の最大慣性力と最大圧電電圧

図10 時定数の影響

つぎに振動数と測定回路の時定数 CR の関係をみるために、時定数を 0.1 s ，ならびに 255 s にして $4 \sim 20 \text{ c.p.s.}$ の振動を加えた場合の V_m の測定結果を図10，図11に示す。圧電素子に加わる全質量は付記のとおりである。すなわち振動の周期に比して、時定数が十分大であれば時定数が測定に及ぼす影響はないようである。

図 11 時定数の影響

したがって図9の結果から、1 V の圧電電圧は 2.32 kg 重に相当し、圧電素子の圧電定数は、 $d_0 = 2.42 \times 10^{-10}$ クーロン/N になる。

4. 校正値の検討

正弦的に変化する慣性力で振動数を f とすれば、 $2\pi f CR = \omega CR \gg 1$ の関係が満たされれば圧電効果による電圧 V は加速度、したがって慣性力 $M\omega^2 A_m$ にほぼ比例するようである。すなわち $(1/CR)$ c.p.s. 以上の振動に基づく慣性力の測定には、感度誤差 1% 以下、進み角が 9° 以下になり実用上支障がないようである⁶⁾。

しかして衝撃的な力は正弦的な力の合成として表わしうる⁷⁾ ため、その基本波について考えれば十分であろう。

まず動的校正の時定数の影響について検討する。図9では $CR = 5.52$ ms, したがって $1/CR = 182$ c.p.s. であるが、この結果から見かけの圧電定数を計算すると図12のよう、100~500 c.p.s. の動電型加振器による校正(図9)では圧電定数は振動数に無関係である。そこで、図10、図11の場合について見かけの圧電定数を計

図 12 動的校正による圧電定数

算すると図13のようになる。すなわち時定数 CR が振動周期より大きければ、見かけの圧電定数は真の圧電定数に等しく(感度係数が1)、動的校正の時定数として妥当なようである。

一方、静的校正の時定数は $C = C_0 + C'_1 = 25,520$ pF, $R \approx 10^{11} \Omega$ (圧電素子の極板間が約 $10^{11} \Omega$, 電位計管の

図10の場合

図11の場合

図 13 見かけの圧電定数

入力等価抵抗が約 $10^{13} \Omega$ の並列抵抗)から、2,552 s である。したがって校正時間中(せいぜい 1 min)において、時定数による測定値の変化は無視できる程度であると考ええる。また圧電素子極板間の抵抗は約 $10^{11} \Omega$ であるが、 BaTiO_3 の固有抵抗は $10^{12} \sim 10^{13} \Omega \text{ cm}$ であるので、筆者らの素子では $10^{12} \Omega \text{ cm}$ を採用しても約 $10^{12} \Omega$ なければならない。したがって圧電素子の表面漏洩電流に対する絶縁をさらに向上させれば、時定数はもう 1 桁ぐらゐ大きくなるものと考ええる。

つぎに動的校正では $d_0 = 2.42 \times 10^{-10}$ クーロン/N, 静的校正では $d_0 = 2.21 \times 10^{-10}$ クーロン/N であるが、この差異についてつぎのように考える。すなわち、静電容量の誤差(2.5%の誤差のものを使用)、ならびに図5において静荷重を加えた場合の測定値をも加味しているためのものである。静電容量を万能インピーダンスブリッジ(横河電機製)で測定すると、公称 5,000 pF のものは 4,850 pF, 20,000 pF のものは 19,600 pF であつた。また図5において静荷重をとり去る場合の陽極電流値のみを採用すると、式(2)で $S_1 = 1/1.15 \mu\text{A/kg}$ となり、測定感度は式(4)から 0.0956 V/kg となる。この値および測定した静電容量値を用いて、圧電定数を計算すると式(5)より、 $d_0 = 2.435 \times 10^{-10}$ クーロン/N となる。したがって動的校正値に対する誤差は 0.6% 強にすぎない。

5. 結 言

圧電素子の圧電効果を利用して力を測定する場合の測定感度の校正について、圧電素子のみに着目し、定常的

な力として静荷重を加えてとり去る場合ならびに正弦的慣性力を加えた場合の校正値を比較検討した。

その結果、静荷重加えてとり去る校正方法を採用し、測定回路の時定数を可及的に大きく（筆者らの場合は2,552 s）すれば、動的な校正結果と比較して大きな差異がないようである。

しかし力の作用時間が短い、いわゆる衝撃的な力に対する測定感度の厳密な校正は、力の作用に対する受圧板の局部的変形の様子を加味した受圧板の等価インピーダンス関数が不明であるため、今後に残された大課題である。
(1962, 5月24日受付)

参考文献

- 1) 木本保夫：放電加工における衝撃力について，電気学会誌，81巻（1961，11）. 1877.
- 2) 木本保夫：放電加工における放電回路の影響，電気学会誌，80巻（1961，3）. 334.
- 3) 前田禎三：放電圧力について，第11回放電加工研究会資料（1958，4）.
- 4) 内藤・宮本・堤・寺尾：電気応用計測，（電気書院）. 38.
- 5) 霜田光一：現代物理学 4，岩波，（1954）54.
- 6) 萩原尊礼：振動測定，p.263.
- 7) 電気通信学会：最近のパルス技術，（1958）10.