

圧電素子を用いた押圧力測定センサの出力特性

吉 岡 正 人*
風 間 篤 志*
長 田 佐 佐*

(平成元年8月31日受理)

Output Characteristics of Piezo-Electric Sensor Developed for Measurement of Indentation Force

by Masato YOSHIOKA*, Atsushi KAZAMA* and Tasuku OSADA*

Abstract

In using piezo-electric ceramics for dynamometers or pressure sensors, the output electric voltage must be correctly converted into the external force. Especially, in the case of small loading rate of external force, it should be taken into account that several variables might induce errors into the resulted output such as the kind of imposed material, loading or unloading, the amount of external force and the loading (unloading) rate.

In this paper, changing the variables mentioned above, the maximum output voltage is measured and the wave form of output voltage is also recorded. Some remarkable results are obtained. For instance, in loading at small loading rate against soft materials, the output wave form becomes extremely flat and the maximum voltage remains constant independently of the amount of external force. An effective method of the conversion is proposed even for such flat form of output voltage by using the integrated voltage instead of the maximum voltage.

1. はじめに

研削または切削抵抗の測定用に、圧電素子を用いた動力計がすでに市販され、広く使用されている¹⁾²⁾。圧電動力計は、抵抗線歪ゲージを利用した動力計などに比べて、測定感度が高く、静剛性が大きく、周波数特性が高い、などの特長がある³⁾。したがって、近年特に注目を集めるようになったセラミックスの研削など、加工中に研削抵抗が高い周波数で変動する場合の抵抗測定において偉力を発揮する。筆者らは、セラミックスなど硬脆材料の単粒研削用に、市販のものよりも特に周波数特性の高い動力計を試作し、その出力特性についてすでに報告した⁴⁾。その結果、筆者らの目

的とする常用の研削、切削速度においては、動力計として満足し得る特性を備えていることが明らかとなった。

ところが、このような圧電動力計を、常用の切削、研削速度よりも極端に低い負荷速度で使用する場合（たとえばベルト研削またはラッピングなど遊離砥粒加工の場合）、あるいは、動力計としてではなく、静的な力の測定センサとして用いる場合には、高速、高周波域での測定とは異なった注意が必要となる。その理由は、外力が加えられて圧電素子の電極間に発生するのが電荷であって電圧ではないことである。そのために、たとえば負荷速度がきわめて小さい場合には、圧電素子の変形速度が小さくなり、それにとまって電荷増加速度が極端に小さくなるため、測定された電圧がそのまま外力の大きさを表すと考えることが出来

* 機械システム工学科, Department of Mechanical System Engineering.

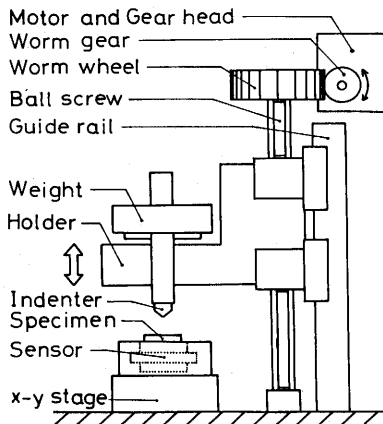


Fig.1 Developed indentation apparatus with small loading rate

なくなる。ところが、従来の動力計による抵抗測定では、ほとんどの場合出力電圧の最大値や平均値に基づいて外力が求められてきた。低負荷速度の条件下では、このような測定法では外力の最大値や平均値すら正しく求められないことは、上述の理由から明らかである。

このような事情から、本研究では、圧電素子を準静的な力の測定センサとして用いた場合、被負荷材質の種類、負荷の大きさ、負荷速度などが電圧出力特性にどのように影響するかを調べた。さらに、測定された出力電圧が、加えられた外力を正しく表示しない場合には、どのように補正すべきかを示した。

2. 実 験

2.1 低負荷速度圧子押し込み装置

外力測定用センサに対し、低速度で負荷を加えることの出来る装置として、低負荷速度圧子押し込み装置を試作した。本装置は、センサの感圧面に接触して置かれた被負荷試料（以下、試料）の表面に垂直に、一定の低速度で圧子を押すための装置であり、材料の硬度測定などにも利用することが出来る。

Fig.1 に本装置の概略を示す。可変速モーターおよびギアヘッドにより所定の回転数に設定されたボールねじの回転により、圧子ホルダーがガイドレールに沿って一定速度で上下する。圧子および負荷用重錘は、ホルダーに支えられているが、圧子先端が試料面に接触するとホルダーから浮き上がって、試料面に負荷が加えられるようになっている。一定時間の負荷を与え

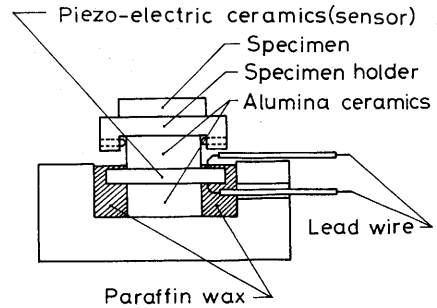


Fig.2 Piezo-electric sensor and specimen holder

た後、モーターを逆転させて一定速度で除荷を行うことが出来る。モーターの回転数は100~1500rpmの範囲で可変であり、これにともなって圧子の上昇、下降速度も0.02 ~ 0.25 mm/s の範囲で変えられる。負荷の大きさは重錘によって調節し、本実験では500gf, 1000gf, 2000gf, 3000gfを用いた。圧子はダイヤモンド製円錐圧子である。先端角度は60°であるが、先端半径が0.1mmであるから、試料面との接触部分では球圧子とみなすことが出来る。

2.2 センサおよび試料保持部

準静的な負荷（押し込み力）に対する測定センサとして、前述のように圧電セラミックスを用いた。セラミックスは直径16mm、厚さ0.7mmのチタン酸鉛鉛板で、試料台との電気的絶縁を保つため、Fig.2 のように絶縁用アルミナセラミックスで上下からはさみ、試料台内に固定してある。試料は、Fig.2 に示すように、試料ホルダー上に接着剤で固定し、試料ホルダーごとアルミナセラミックスにかぶせて固定する。試料台の下に設置されたx-yステージの移動により、圧子押し込みの位置を変えることが出来る。

2.3 押し込み条件

前述のように、本研究の第一の目的は、低負荷速度領域において、負荷速度、負荷の大きさなど、センサに加わる負荷条件が、電圧出力にどのように影響するかを求めることである。ここで負荷速度とは、圧子降下速度のことであるが、これは必ずしもセンサの感圧面の変形速度と同じではない。なぜならば、圧子降下速度が同じであっても、圧子先端が試料表面に接触してから後は、先端の試料内への侵入速度は試料の種類によって異なり、試料の硬度に依存すると考えられるからである。センサからの出力は、感圧面の変形速度

loading rate (mm/s) (falling or raising speed of indenter)	0.10, 0.20, 0.25
loading weight (gf)	500, 1000, 2000, 3000

Table 1 Condition of indentation

に依存すると考えられるから、試料の硬度もまた出力特性に影響を与える因子と考えなければならない。

よって本実験では、硬度を含む機械的性質が極端に異なるガラス、MgO単結晶、銅の三種類の材料を選んで押し込み用試料とした。ガラスは方向性をもたない非金属硬脆材料であり、三種類のうちでは最も硬い。したがって、塑性変形能力は最も小さい。MgO単結晶は機械的性質が異方的で、脆い材料であるが、ガラスに比べてある程度の塑性変形能力を持っている。銅は代表的な軟質金属で、塑性変形能力は前二者に比べて桁違いに大きい。これら三種類の材料から、およそ $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}$ の正方形板の試験片を切断し、試験片ごとの厚みの差が 0.05 mm 以下になるように表面を研磨して押し込み用試料とした。

これらの試料に対し、圧子降下速度および負荷の大きさをTable 1のように変えて押し込みを行った。なお、一回の押し込みに対しては、圧子の降下速度と、負荷後の上昇速度は同じである。

3. 結果および考察

3.1 試料材質による出力電圧波形の相違

三種類の試料に対する圧子押し込みを行って得られた代表的な出力電圧波形をFig.3に示す。波形は、負荷の大きさや負荷速度によっても異なるが、ここでは圧子降下速度 0.25 mm/s 、負荷の大きさ 500 gf 、 3000 gf の場合のみを示した。まず最初に、材質による波形の著しい相違に注目する。 500 gf の負荷による押し込みで、ガラス、MgOに対しては負荷時、除荷時ともに鋭い電圧のピークが現れており、ピーク電圧値は、負荷時の方が

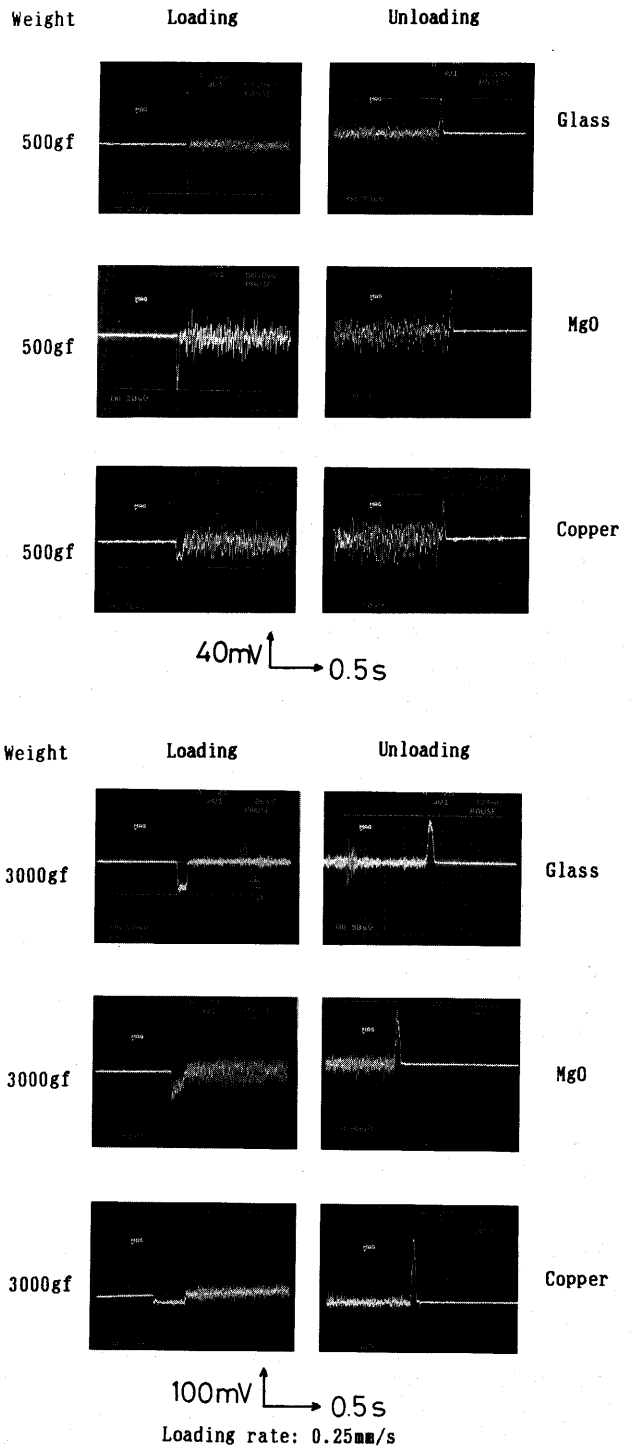


Fig.3 Wave form of output voltage

20%程度大きい。一方、銅に対しては、負荷時には除荷時ほどの鋭いピークは認められず、波形は台形状となる。また出力電圧の最大値も、ガラス、MgOとは逆に除荷時の方が2倍程度大きくなっている。このような、材質および負荷時と除荷時の出力電圧波形および最大出力電圧値の著しい相違は、3000gfの負荷においてさらに顕著になる。すなわち、3000gfの負荷では、ガラスやMgOにおいても負荷時に波形がやや横に広がる傾向が現れ、同時に最大出力電圧（ピーク電圧）は除荷時のピーク電圧よりも小さくなる。このように鋭いピークをもつパルス状の波形から台形または台地状に波形が変化する現象を、以後波形の“偏平化”と呼ぶことにする。このような波形の偏平化は、負荷時においてのみ現れ、同一負荷条件ではガラス、MgO、銅の順に大きくなる。

ここで波形の偏平化の原因について考える。試料が理想的に硬くて剛体とみなし得る場合、圧子先端が試料面に接触してから後の圧電素子の変形を、剛体と弾性体（圧電素子）の直列連結モデルでおきかえて考える。この系に、質量1kgの重錘が付加された状態での系の固有振動数 ω を求め、圧電素子のヤング率 $E = 1.13 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ より、 $\omega = 1.47 \times 10^4 / \text{s}$ となる。すなわち、試料が理想的に硬ければ、階段状入力に対しては、圧電素子は10kHz以上の周波数で応答するから、Fig.3に示した時間スケール上では、試料面に負荷が加えられた直後に鋭いピークを示し、以後は測定回路の時定数に従って減少するはずである⁵⁾。本実験における測定回路の時定数は10msのオーダーであるから、観察される波形は、幅数十msのパルスになることが期待され、試料が硬い場合や、除荷時にはいずれもそのような波形が観察されている。ところが、銅のような軟らかい材料に対する負荷においては、圧子先端が材料を塑性的に変形させながら材料内に侵入するため、圧電素子の変形速度が、圧子降下速度よりもずっと小さくなることが予想される。変形速度が小さくなれば、圧電素子表面の電荷発生速度は小さくなり、変形開始直後の立ち上がり電圧（最大出力電圧）が小さくなることを予想される。そのため軟らかい材料ではそれだけ出力電圧が小さくなり、そのかわり出力継続時間が長くなって波形が偏平化するものと思われる。除荷時には材料の硬さには関係なく、圧子上昇速度にしたがって感圧面上で一定速度の除荷が行われるから、波形の偏平化は生じない。

3. 2 負荷速度および負荷の大きさの影響

圧電素子を力の測定センサとして用いる場合、最も問題になるのは外力（負荷）の大きさと出力電圧の関係である。ここでは、負荷の大きさおよび負荷速度（圧子降下速度）を変化させた場合に、出力波形および最大出力電圧がどのように変化するかを述べる。Fig.4に、最大出力電圧が負荷の大きさによってどのように変化するかを示す。この関係は圧子降下速度および材料の種類によって変わり、Fig.4では材料ごとに圧子降下（上昇）速度をパラメータとして示してある。Fig.4およびFig.3から、最大出力電圧と負荷の大きさおよび負荷速度の間には、以下の関係が認められる。

- (1) 負荷、除荷の場合とも、最大出力電圧には負荷速度の影響が顕著に認められ、銅500gfの場合を除いて、出力は速度の大きいほうが高くなる。
- (2) 負荷の増加に対する最大出力電圧の増加は除荷の場合にはいずれの材料でも顕著に認められ、両者の関係はほぼ直線的である。
- (3) 一方負荷の場合には、最大出力電圧は負荷の増加に対して除荷の場合ほど顕著に増加せず、特に銅に対しては、負荷1000gf以上で出力は負荷の増加に対してほとんど変化しない。
- (4) 負荷の増加に対して最大出力電圧が増加しない場合には、前節で述べた波形の偏平化が著しくなり、最大出力電圧が増加しないかわりに出力の継続時間が長くなる。

このうち(1)は、圧子降下速度が大きいほど、試料表面に加えられる衝撃力が大きくなるから当然予測されることである。圧子降下速度（圧子と試料面の衝突速度）と衝撃力との関係はすでに報告した通りである⁴⁾。(2)(3)および(4)については前節ですでに考察した通りである。なお(4)で述べている出力継続時間は、負荷の増加とともに長くなるが、これは次のように考えられる。負荷が大きくなると、圧子先端の侵入による凹みが大きくなり、それだけ塑性変形量が増加するので変形に要する時間が長くなるため、出力継続時間が大きくなるのであろう。負荷の大きさが増加しても塑性変形速度が変わらないとすれば、変形速度に比例する電荷発生速度は一定値を保ち、そのため出力電圧の変動が小さくなり、一方出力継続時間は増加することになる。

以上の考察から、最大出力電圧は試料の塑性変形速度に依存し、これは試料の材質によって大きく異なることは明らかである。したがって、圧電素子を各種動

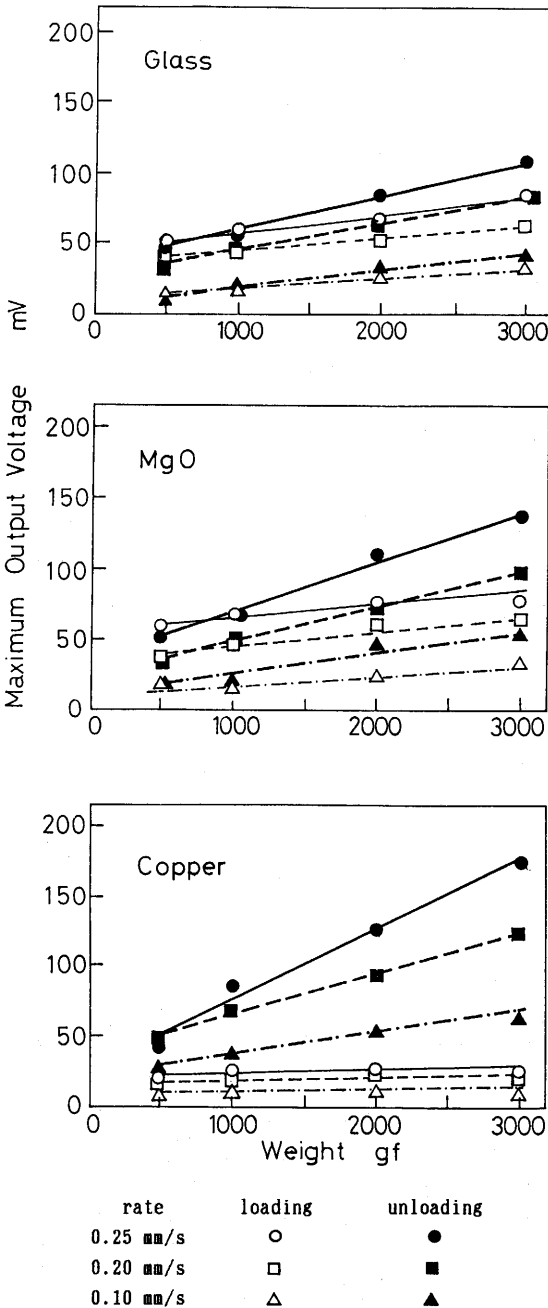


Fig.4 Maximum output voltage vs loading weight at various loading rate for each kind of materials

力計や力の測定センサとして用いる場合には、最大出力電圧値のみから力の大きさを議論することは、測定結果に誤差を生ずる原因となる。

3.3 積算電圧による校正

これまでに得られた結果から、最大出力電圧から力の大きさを求めることは、ある場合には測定結果に大きな誤差を生ずることが明らかになった。そこで、以下に述べる考え方にしたがって、得られた出力電圧から力の大きさを求める新たな校正法を考える。

圧電素子の感圧面に垂直に力 F を加えると、素子の表面には F に比例する電荷 Q が発生する。すなわち、

$$Q = k F \quad (k: \text{圧電定数}) \quad (1)$$

いま仮に、時刻 $t = 0$ において押し込みを開始するとすれば、時刻 t における素子の電荷 $q(t)$ は、測定回路への漏洩分を差し引いて、

$$q(t) = Q(t) - \int_0^t i(t) dt \quad (2)$$

と表すことが出来る。 i は回路を流れる電流で、測定回路のインピーダンスを Z とすると、オームの法則により極間電圧 $V(t)$ との間に

$$i(t) = V(t) / Z \quad (3)$$

が成立する。また q は圧電素子の極間容量 C を用いて

$$q(t) = CV(t) \quad (4)$$

と表せるものとすれば、(1)、(3)、(4)を(2)に代入して

$$CV(t) = k F(t) - \int_0^t \frac{V(t)}{Z} dt \quad (5)$$

が得られる。書きかえると、

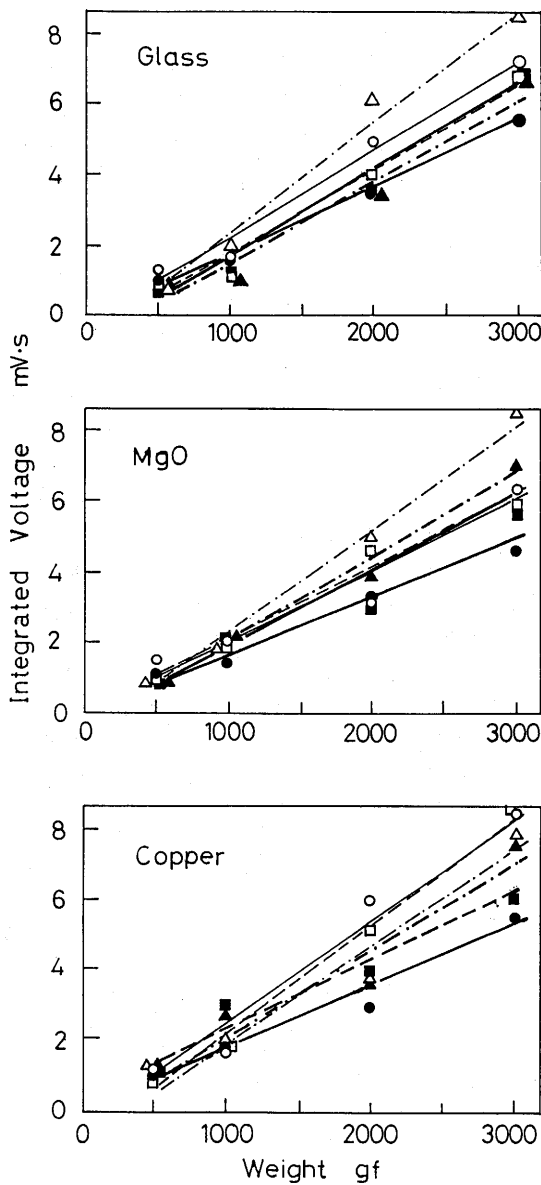
$$F(t) = [CV(t) + \int_0^t \frac{V(t)}{Z} dt] / k \quad (6)$$

となる。すなわち、圧子押し込み過程の押圧力は、(6)式によって求められることになる。押し込み終了後は、 $t \rightarrow \infty$ で $V(t) \rightarrow 0$ となるから、 $F(t)$ は一定値

$$F_0 = \frac{1}{kZ} \int_0^{\infty} V(t) dt \quad (7)$$

となる。この値は、重錘の重量に等しいから、試料の材質、圧子降下速度等によらない値となるはずである。(7)式右辺の積分値を積算電圧と呼ぶことにする。

(7)式を用いて、Fig.4に示した各条件の圧子押し込みに対して、記録された出力電圧波形から積算電圧を求めた。その結果をFig.5に示す。



rate	loading	unloading
0.25 mm/s	○	●
0.20 mm/s	□	■
0.10 mm/s	△	▲

Fig.5 Integrated voltage vs loading weight at the same conditions of indentation as shown in Fig.4

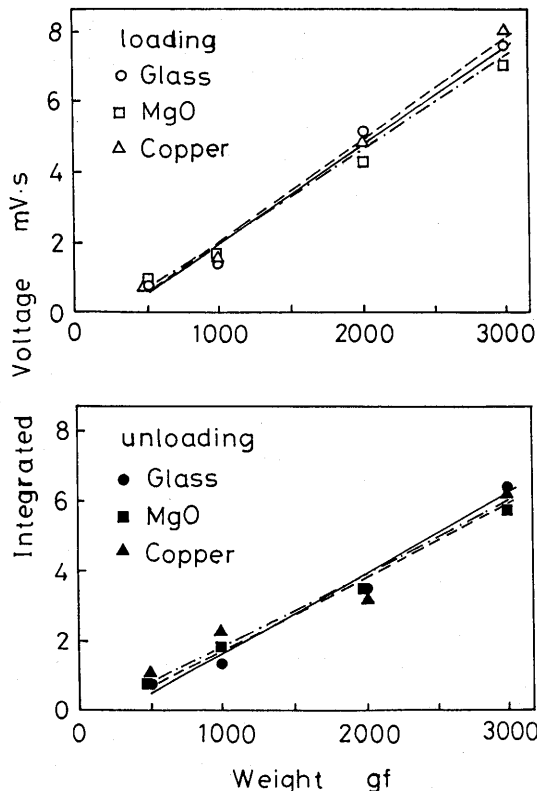


Fig.6 Integrated voltage vs loading weight for different kinds of materials

Fig.5 から、いずれの材料に対しても負荷時、除荷時ともに積算電圧は負荷荷重の大きさとともにほぼ直線的に増加し、Fig.4 に見られたような材質による著しい相違は大幅に減少している。また、負荷速度の影響もFig.4 より小さくなっている。Fig.6 は、三種類の負荷速度における積算電圧の値を材料ごとに平均して示したものであるが、Fig.6 にはもはや材質による相違はほとんど認められない。したがって、積算電圧を用いれば、使用する材料の種類に関係なく重錘の重量を測定することが出来ることがわかる。Fig.6 において、負荷時と除荷時の間の積算電圧値の相違は依然として認められるが、これももちろんFig.4 よりはずっと小さくなっている。

4. 結 論

切削、研削動力計や、各種圧力測定用センサとして広く用いられる圧電素子を、きわめて低い負荷速度における力の測定センサとして用いる場合の、負荷荷重-電圧出力特性を求めるために、低負荷速度圧子押し込み装置を試作した。これを用いて、負荷の大きさ、負荷速度などの押し込み条件、押し込み用試料の材質を変えながら最大出力電圧および出力波形を測定した。おもな結論は以下の通りである。

- (1) 最大出力電圧、出力波形とも、試料の材質、負荷条件、負荷形態（負荷、除荷）によって大きく変化し、なかでも試料の材質および負荷形態による影響が大きい。
- (2) 除荷の場合には、試料の材質や負荷条件によらず鋭いピークをもつパルス状の出力が得られるが、負荷の場合には、試料が軟らかいほど、負荷速度が小さいほど、波形の偏平化が大きくなる。この場合、波形は台形状または台地状となる。
- (3) 出力波形が台形状、台地状となる条件のもとでは、負荷を増加しても最大出力電圧はほとんど増加せず、そのかわり電圧出力の継続時間が増加する。
- (4) 出力波形の偏平化が生ずるのは、圧子が塑性変形能力の大きい材料の内部へ侵入する際、圧電素子の感圧面における変形速度が圧子降下速度に比べて小さくなるためと考えられる。

- (5) 出力電圧波形が偏平化する条件のもとでは、最大出力電圧を用いて、圧子押し込み過程終了後の重錘の重量を求めることは出来ない。この場合には、出力電圧を出力継続時間にわたって積分した積算電圧を用いることによって重錘の重量を求めることが出来る。

参 考 文 献

- 1) 塩崎 進, 宮下政和: 研削動力計の試作, 精密機械, 35, 7 (1969) 471
- 2) 長田 佐: 圧電セラミックによる圧力センサ, 自動化技術, 14, 9 (1982) 97
- 3) 庄司克雄: 砥粒の動的切削力の測定, 精密工学会誌, 52, 4, (1986) 595
- 4) 吉岡正人, 長田 佐: 圧電素子を用いた単粒研削用動力計の出力特性, 精密工学会誌, 55, 10 (1989)
- 5) 古川英一: 振動および衝撃測定, 誠文堂新光社 (1961) 38