

## 太陽光発電パネルを用いた産業機器駆動の可能性 －積層型圧電アクチュエータの変位－

### A Feasibility of Industrial Application of a Solar Cell Module - Displacement of Stacked Piezoelectric Transducer -

鳥井昭宏 †、板津佑樹 †、植田明照 †、道木加絵 † †  
Akihiro Torii, Yuki Itatsu, Akiteru Ueda, Kae Doki

**Abstract** This paper describes a feasibility of industrial application of a solar cell module. Although the solar cell becomes popular, the power generated by the solar cell is several kW/m<sup>2</sup>, which is not suitable for industrial application. A piezoelectric actuator, which is deformed by the applied voltage, is a small capacitive load. A 120 cm<sup>2</sup> solar cell module is used to drive a light capacitive load. The energy generated by the module is directly applied to the piezoelectric actuator. Sunshine is simulated by a light which is applied to the solar cell module. The voltage, current, charge, and deformation of the piezoelectric actuator are measured. Under the experimental conditions, the voltage, charge, and deformation of the piezoelectric actuator are almost proportional to the input power of the light.

#### 1. はじめに

地球温暖化や異常気象など気候変動の原因として、温室効果ガスの排出が指摘されている。産業活動や日常生活における温室効果ガスの削減が気候変動の防止に効果的である。現代社会においては、社会生活で使用する電力の約 30%が化石エネルギーから発生されており、直接的に温室効果ガスを発生している。原子力発電は温室効果ガスの発生が原理的にゼロである利点がある。しかし、核技術を用いた発電手法に対する安全上の不安がつきまとう。風力発電では、風車の回転にともなう健康被害なども報告されている。

太陽光発電パネルを用いた発電システムは、発電時に温室効果ガスを発生しないだけでなく、安全面からも期待が高い発電方法である。ところが、現状で利用可能な太

陽光パネルを用いた発電では、100W の発電に約 1m<sup>2</sup> の面積が必要であり、数 kW クラスの産業用機器の駆動に太陽光パネルを用いることは現実的でない。逆に、1W 程度の小形アクチュエータの駆動であれば、0.01m<sup>2</sup> 程度の太陽光パネルで十分である。産業界における電力消費の約 50%が電磁アクチュエータであるモータによって消費されていること<sup>1)</sup>、消費電力が 1W 程度の小形アクチュエータの市場規模が 50 億台規模であること<sup>2)</sup>を考慮すると、小形アクチュエータの 1%を太陽光発電パネルによって駆動するだけでも、相当数のアクチュエータが太陽光発電によって駆動され、化石燃料による電力の消費を削減することができ、その結果、温室効果ガスの削減が期待できる。

小形アクチュエータの一種類に積層型圧電アクチュエータがある。積層型圧電アクチュエータは、微小変位を発生する小形の固体アクチュエータの一種である。逆圧電効果によって微小変位を発生する。概ね 10mm の長さの積層型圧電アクチュエータに 100V の電圧印加によって、10 $\mu$ m 程度の微小変位を発生する。サブミクロンや数十ナノメートルの変位が容易に得られることから、走査

† 愛知工業大学工学部電気学科 (豊田市)

† † 愛知工業大学工学部機械学科 (豊田市)

型プローブ顕微鏡用の微動機構用のアクチュエータとして、あるいは光学系の精密位置決め要素として用いられる。逆に 0.1mm を超える変位の発生は困難であるものの、変位拡大機構やインチワーム型アクチュエータを構成し、あるいは超音波モータを構成することにより、高機能デバイスとして着実に需要を増やしつつある。

筆者らはこれまでに積層型圧電アクチュエータと電磁石を組み合わせたインチワーム型のマイクロロボットを製作してきた<sup>3)</sup>。電磁石の吸着と積層型圧電アクチュエータの伸縮の位相を制御することによって、平面上での並進動作と回転動作を行った。これらの動作は数ミクロンの微小な動作であった。使用した積層型圧電アクチュエータは 0.1mA 以下の漏れ電流と 100V 程度の印加電圧によって求められる。

そこで本論文では、太陽光発電パネルを用いて積層型圧電アクチュエータの駆動を試みる。最大発電電力が 1W の小型太陽光発電パネルを用いて、圧電アクチュエータを駆動する。太陽光パネルの発生電力を用いてマイクロロボットの動力源である積層型圧電アクチュエータの駆動を試みることにより、太陽光発電パネルを用いた産業用機器駆動の実現可能性を探る。

## 2. 実験装置

通常の太陽光発電システムでは、太陽光パネルの直流出力電力をキャパシタに蓄える。キャパシタの直流電力をインバータによって交流電力に変換して商用電力系統に連系するため、日射量の変動による出力電圧変化を防ぐため、あるいは天候の変化による太陽光発電パネルの発電電力の変動に備えるためである。しかし、キャパシタの利用は、太陽光発電パネルの少ない発生電力を損失として無駄に消費する危険がある。

本研究では、太陽光発電パネルと積層型圧電アクチュエータを直接接続した閉回路を構成し、太陽光パネルの発生電力を用いた積層型圧電アクチュエータの駆動を試みる。太陽光発電パネルは、電流源と理想的でないダイオードを接続した等価回路で表される。圧電アクチュエータは容量性負荷であり、抵抗、インダクタ、容量を用いて等価回路が表される。これらを直接接続することによって、図 1 の等価回路を得る。圧電アクチュエータの駆動に電流パルスを用いた方法が提案されている<sup>4)</sup> こともあり、電流源である太陽光発電パネルを用いて容量型負荷である圧電アクチュエータの駆動を試みることに意義がある。

微小変位を発生する積層型圧電アクチュエータには、NEC トーキン社製の AD1010D20F を用いる。その特性(カ

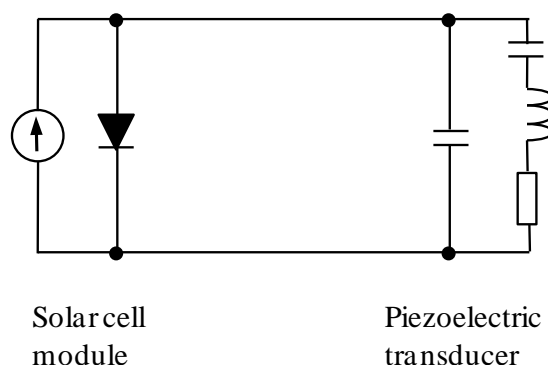


Figure 1: Electrical equivalent circuit of a solar cell and piezoelectric actuator



(a) Light and solar panel (b) piezoelectric actuator  
Figure 2: Experimental setup

Table 1: Specification of piezoelectric actuator

Overall length [mm]	20
Cross section [mm <sup>2</sup> ]	10 x 10
Generated force [N]	3500
Resonance frequency [kHz]	69
Capacitance [μF]	5.4
Insulation resistance [MΩ]	2
Displacement [μm] at 150 V <sub>DC</sub>	18.4

Table 2: Specification of solar panel

Active area [cm <sup>2</sup> ]	11.5 x 10.6
Specified load voltage (V <sub>ld</sub> ) [V]	7.5
Typical current at V <sub>ld</sub> [mA]	150
Open circuit voltage [V]	10.3
Short circuit current [mA]	160

タログ値) を表 1 にまとめた。最大印加電圧は 150V であり、通常は 0-100V の範囲で使用する。印加電圧に対する変位量は 120nm/V である。

太陽光発電パネルには BP Solar 社製の MSX-01 を用いる。その特性を表 2 にまとめた。受光面は縦 115mm、横 106mm で、出力は約 1W である。

実験装置の概略を図2に示す。太陽光を模擬した白熱電灯の照射によって太陽光発電パネルが直流電力を発生し、その電力を利用して積層圧電アクチュエータが微小変位を発生する。白熱電灯は60Hzの商用電源によって駆動される。太陽光強度の変化は白熱電灯の光強度変化によって模擬され、スライダックを用いた白熱電灯への入力電圧変化によって実現できる。

閉回路を流れる電流の測定には、日本レム社製の電流センサCT1-Tを用いる。電流センサの出力をデータレコーダにて収集する。積層型圧電アクチュエータの変形量は小野測器社製のレーザ干渉計LV-2100によって求める。測定結果は圧電アクチュエータの伸長量ではなく、先端に取り付けたミラーの位置を示した。

### 3. 実験

実験では圧電アクチュエータの端子電圧、閉回路を流れる電流、積層型圧電アクチュエータの変位量を測定する。図1の等価回路から明らかなように、太陽光発電パネルの出力電圧は圧電アクチュエータの端子電圧に等しい。

一般に、圧電アクチュエータの変位  $x$  は、印加電圧  $V$  あるいは蓄積電荷  $Q$  に比例する。すなわち、

$$x \propto V \tag{1}$$

あるいは

$$x \propto Q \tag{2}$$

の関係がある。ところで、圧電アクチュエータに蓄積される電荷  $Q$  は、圧電アクチュエータに流入した電流  $i$  の時間積分に等しいため、

$$Q = \int idt \tag{3}$$

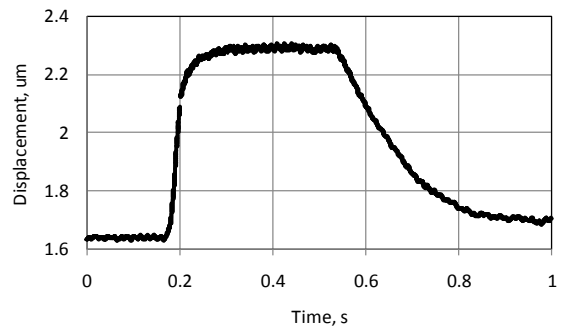
であり、式(2)(3)より、

$$x \propto \int idt \tag{4}$$

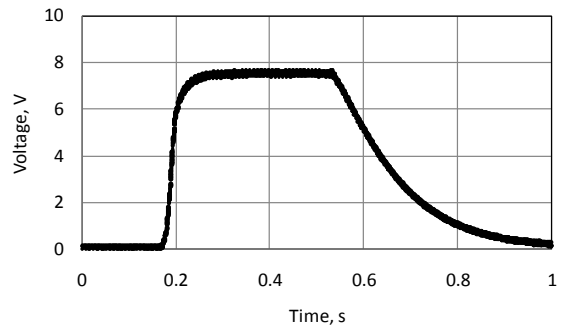
が得られる。

したがって、圧電アクチュエータの端子電圧  $V$ 、あるいは流入電流の積分である蓄積電荷  $Q$  を求めることによって、圧電アクチュエータの変形量  $x$  を推定できる。このことは、変位センサを用いることなく圧電アクチュエータを制御できる可能性を示しており、精密動作をセンサレスで実現する上で有用である。

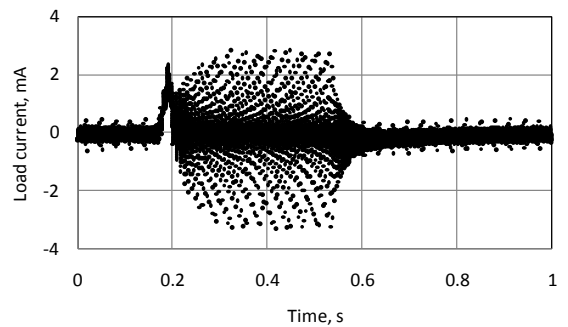
消灯状態の白熱電灯に120Vの電圧を印加し、点灯するときと消灯するときの、圧電アクチュエータの変位、



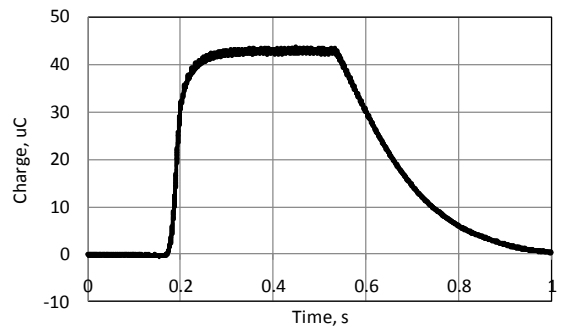
(a) Displacement



(b) Voltage



(c) Load current



(d) Calculated charge

Figure 3: Result obtained by 120 V input to the light

圧電アクチュエータの端子電圧、閉回路に流れる電流を測定する。圧電アクチュエータの蓄積電荷は、流入電流を数値的に積分して求める。白熱電灯への入力電圧を変化して、白熱電灯の照射強度を変化させる。使用する実験装置の制約から、入力電圧を 40-120V の間で変化させて同様の実験を繰り返し、負荷である圧電アクチュエータの動作を明らかにする。

#### 4. 実験結果

白熱電灯の点灯・消灯時の測定結果を図 3 に示す。太陽光を模擬した白熱電灯に商用の交流電源を 120V に昇圧して与えた。積層型圧電アクチュエータの変形量(a)、端子電圧(b)、閉回路を流れる負荷電流(c)、および蓄積電荷(d)を示す。照射時間は約 0.4s 間とした。積層型圧電アクチュエータの蓄積電荷は、測定された負荷電流から数値的に求めた。

はじめに、各波形の立ち上がり時間、立下り時間を求めた。変位、電圧、蓄積電荷の振幅が 10% から 90% に至るまでの立ち上がり時間は、それぞれ 40ms、35ms、32ms であった。一方、変位、電圧、蓄積電荷の振幅が 90% から 10% に至るまでの立下り時間は、それぞれ 270ms、278ms、280ms であった。得られた立ち上がり時間、立ち下り時間には測定誤差が含まれるが、現在のところ誤差の評価は行っていない。一般に、積層型圧電アクチュエータの収縮に要する時間は伸長に必要な時間よりも数倍大きい。これらの立ち上がり・立下り時間の相違は積層型圧電アクチュエータの性質によるものと考えられる。

時刻  $t=0.16s$  に白熱電灯を点灯すると、白熱電灯の光線を受けて太陽光パネルが電流を発生し、その電流は閉回路を流れて積層圧電アクチュエータに電荷として蓄積され、積層型圧電アクチュエータの端子電圧が上昇し、変位が増大する。負荷電流は積層圧電アクチュエータに電荷となって蓄積し、電荷量の増加にともなって電流が減少する。

図 3 (c) が示すように、負荷電流の測定結果には多くの雑音成分が見られる。この雑音成分は約 60Hz であり、商用電源の影響である。時刻 0.16s から 0.55s の間の電流については、測定システムのサンプリング時間やインピーダンスも含めて、今後、詳細な検討が必要であると考えている。しかしながら、白熱電灯を点灯した時の負荷電流は、時刻 0.18s から 0.20s 付近で上昇している。最大で 2mA 程度であり、太陽光発電パネルから積層型圧電アクチュエータに電力が供給されたことがわかる。変位、電圧、電荷は時刻 0.5s までに飽和状態となり、変位は

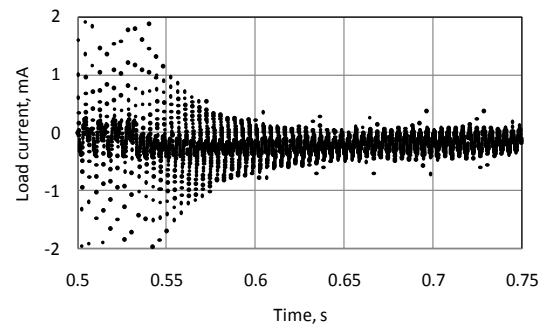
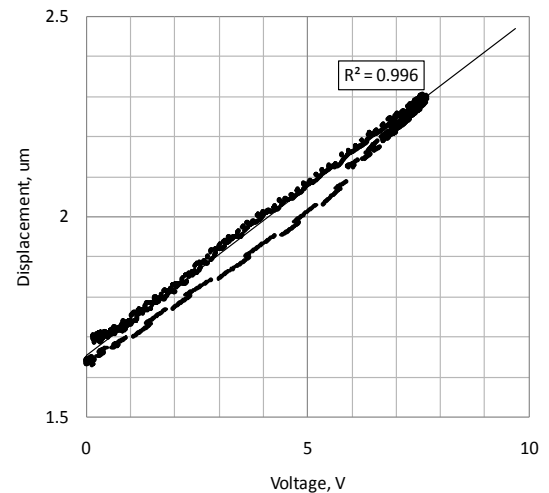
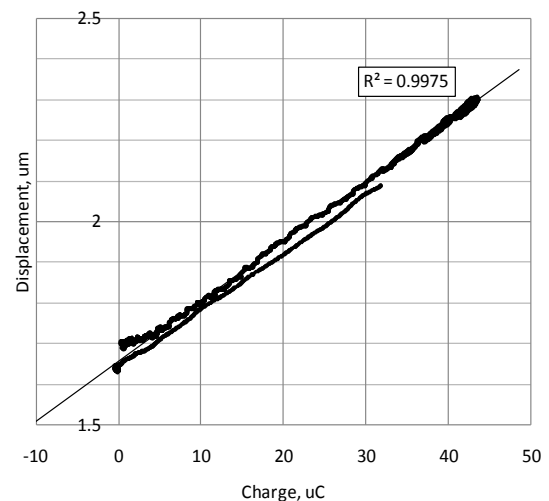


Figure 4: Magnified load current



(a) Displacement vs. voltage



(b) Displacement vs. charge

Figure 5: Displacement, voltage and charge in piezoelectric actuator

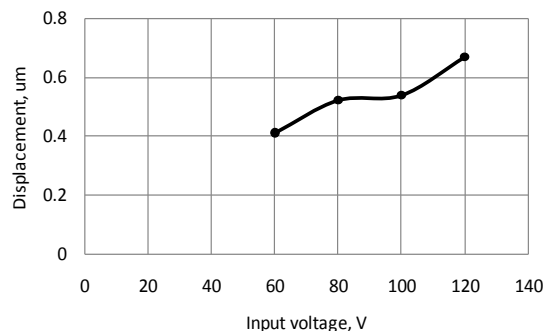
0.65 $\mu\text{m}$ 、端子電圧は 7.5V、電荷は 43 $\mu\text{C}$  となった。

時刻 0.55s に白熱電灯を消灯した。このとき、積層型圧

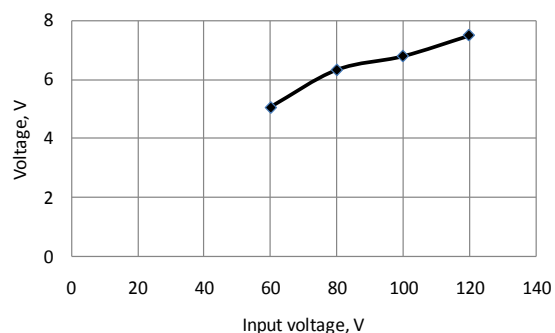
電アクチュエータは蓄積された電荷を放出し、初期状態に復帰する。放出される電荷は、白熱電灯の点灯時と逆向きの電流となって検出される。図3(c)の時刻 0.55s から 0.60s の間に、最大で-1mA の電流が見られるが、雑音成分が多く明瞭に観察されているとは言い難い。そこで、時刻 0.50s から 0.75s の間の拡大図を図4に示す。負の向きの電流が生じていることがわかる。その電流の最大の大きさは、雑音成分を除去して-0.2mA 程度と推定され、時刻 0.75s に向かってゼロに近づきつつあることがわかる。この現象は、積層型圧電アクチュエータに蓄積された電荷が、太陽光パネルに少しずつ逆流していることを意味する。

次に、積層圧電アクチュエータの変形量、端子電圧、電荷の関係を求めた。図3の結果を基に、変形と端子電圧、変形と電荷の関係を求めた。結果を図5に示す。わずかなヒステリシスを含んだ軌跡を描いている。白熱電灯を点灯し、圧電アクチュエータが伸長するときに、測定結果に不連続な点が現れている。この原因は今のところ、明らかになっていない。一方、圧電アクチュエータが収縮するときには、ほぼ直線となり変形と端子電圧、変形と蓄積電荷の間に直線的な関係があることがわかる。いずれにせよ、得られた結果は、使用した実験条件の下では、圧電アクチュエータの変形と端子電圧、蓄積電荷の間に、高い相関関係があることがわかる。それらの相関を伸長時と収縮時を合わせて評価すると、端子電圧と変位の相関が 0.996 であり、蓄積電荷と変位の相関が 0.9975 である。精密動作に使用されることの多い積層型圧電アクチュエータにとっては、端子電圧測定、あるいは流入電流測定にもとづくセンサレス変位計測が可能になると期待される。これは、太陽光発電パネルが原理的に電流源と考えられるからである。

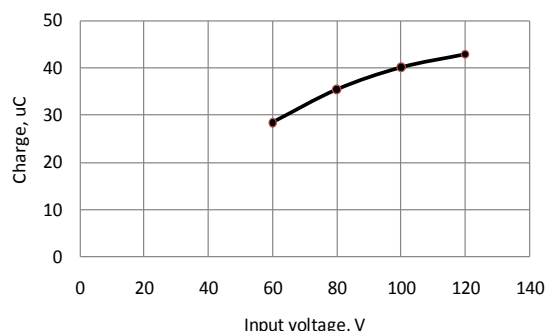
最後に、太陽光を模擬した白熱電灯への入力電圧を変化させたときの圧電アクチュエータの変形量、端子電圧、および蓄積電荷を求めた。結果を図6に示す。今回の実験では、60W の白熱電灯を用い、白熱電灯への入力電圧を 60-120V で変化させ、図3と同様の測定を繰り返した。図6(a)は飽和状態の圧電アクチュエータの変位量、図6(b)は飽和状態の圧電アクチュエータの端子電圧、図6(c)は数値的に得られた蓄積電荷の飽和値である。いずれの結果も、白熱電灯への入力電圧の上昇にともなって増加していることがわかる。太陽光発電パネルの出力電圧と出力電流には上限があること、微弱な光に対しては外部環境の影響を受けやすいこと、などの理由により、今後は実験条件を広げて実験を繰り返す必要がある。



(a) Displacement vs. input voltage



(b) Piezo voltage vs. input voltage



(c) Charge vs. input voltage

Figure 6: Displacement, voltage and charge of various input voltage to the light

#### 4. まとめ

産業用機器を太陽光発電パネルで駆動するための第一段階として、太陽光パネルを用いた積層型圧電アクチュエータの駆動を試みた。使用した積層型圧電アクチュエータは消費電力が小さく、容量型の負荷である。数十 cm の大きさの太陽光発電パネルと長さ 20mm の積層型圧電アクチュエータを直接接続し、太陽光を模擬した定格電力 60W の白熱電灯を照射した。白熱電灯への入力電圧を 120V としたときに、積層圧電アクチュエータの最大変位が得られ、その値は 0.65 $\mu$ m であった。

白熱電灯への電圧印加時の、積層圧電アクチュエータの端子電圧、流入電流を測定した。流入電流の積分であ

る積層型圧電アクチュエータの蓄積電荷は数値的に求めた。変位計によって得られる圧電アクチュエータの変位量と、端子電圧、蓄積電荷の間に高い相関が得られた。この結果は、積層圧電アクチュエータの変位計測に、端子電圧測定、あるいは流入電流測定にもとづくセンサレス計測が可能であることを示唆している。

今回の実験条件の下では、太陽光強度の変動を模擬するために白熱電灯への入力電圧を変化させたところ、入力電圧の増加にともなって積層型圧電アクチュエータの変形量が増大した。同時に、端子電圧、蓄積電荷も上昇した。太陽光発電パネルの出力電圧・電流・電力には原理的に限界があるため、今回の実験条件よりも広い範囲の実験を繰り返し、太陽光発電パネルを用いた積層型圧電アクチュエータの駆動特性を明らかにする必要がある。

以上より、本稿で述べた太陽光発電パネルを用いた圧電アクチュエータの駆動は、小消費電力の産業用機器駆動の試みの一つとして有用であると考えられる。特に容量性負荷である圧電アクチュエータを、電流源である太陽光パネルで駆動した点に意義がある。今後は、本稿で述べ

た実験結果を、誤差の評価を含めて詳細に分析した上で、太陽光発電パネルをエネルギー源とした精密動作実験、ならびに電磁モータなどの誘導負荷を対象とした駆動実験を行った上で、産業用機器の駆動実験を行う予定である。

#### 参考文献

1. [http://industrial.panasonic.com/jp/i/25000/n\\_AA01000/n\\_AA01000/pdf/br\\_1.pdf](http://industrial.panasonic.com/jp/i/25000/n_AA01000/n_AA01000/pdf/br_1.pdf) など
2. <https://www.fuji-keizai.co.jp/market/09036.html> など
3. 加藤治奈・早川和明・鳥井昭宏・植田明照：圧電素子と電磁石を用いた XY $\theta$ アクチュエータ、電気学会論文誌 C、119 巻 1 号、pp. 57-62、1999
4. K. Furutani and Nobuyuki Ohta, Displacement Monitoring of Stacked Piezoelectric Actuator by Observing Induced Charge, International Journal of Automation Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 12-17 (2008)
5. 辺見信彦・久保明洋・吉村一生・田中道彦・山木宗人、圧電式ジャークセンサの研究、2009 年度精密工学会春季大会、M02

(受理 平成 22 年 3 月 19 日)