光サーボシステムの基礎的研究* (PLZT素子の光起電力効果の温度依存性)

松熊昭憲^{*1}, 中田 毅^{*2}, 森川 泰^{*3}

Study on Optical Servosystem (Temperature Dependency of Photovoltaic Effect in PLZT Element)

Akinori MATSUKUMA, Takeshi NAKADA and Yasushi MORIKAWA

This paper deals with the temperature dependency of the photovoltaic effect in PLZT element which plays an important role of the characteristics of the optical actuator using PLZT element. Firstly, it is shown by the experiment that the photovoltaic effect is greatly affected by the temperature of the PLZT element. Then, it is clarified that its temperature dependency ascribes to the reduction of the electric resistance in PLZT element with the increase of the temperature. Finally, the validity of the simulation of the photovoltaic effect including the temperature dependency is shown by the experiment.

Key Words: Optical Servosystem, Optical Actuator, PLZT Element, Photovoltaic Effect, Temperature Dependency

1. 緒 言

近年、電気・電子技術を駆使したサーボシステムが広く利用されているが、システム周辺の電磁ノイズ環境は厳しくなりつつあり、安全性、信頼性などの面から電磁ノイズ干渉に対する配慮が重要な課題となっている。光情報と光エネルギーを積極的に利用した光サーボシステムは電磁ノイズ干渉問題を根本的に解決するばかりでなく、非接触エネルギー供給が可能であるなどの特長を有するため、マイクロマシン分野などの高度な極限システムへの適用が期待され、その実現に向けてさまざまな光アクチュエータ系が提案^{(1)~(3)}されている。著者らは、これまでに一種の圧電セラミックスであるPLZT素子に波長が365 nm程度の紫外光を照射することによって発生する光起電力効果、光ひずみ効果に関する研究⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾を進め、PLZT素子が光アクチュエータとして適用可能であることを実験およびシミュレーションにより明らかにした。これら研

究では、前記の諸効果を明確にするため、光照射によってPLZT素子の温度変化が発生しないように、光源からの光を狭帯域バンドパスフィルタを用いて波長がほぼ365 nmの紫外光に単色化し、PLZT素子に照射した。しかし、光アクチュエータの使用環境を考慮すれば、PLZT素子自体の温度が大幅に変化する場合も多く、その結果光アクチュエータの特性に大きな影響を与えることが予想される。

そこで本研究では、光アクチュエータの特性に主要な役割を果たすPLZT素子の光起電力効果に与える温度の影響を明らかにすることを目的としている。

はじめに、光起電力効果のステップ応答実験を行い、発生する光起電圧の温度依存性を示し、ついで、PLZT素子の電気抵抗、光起電流および電気容量に与える温度の影響を調べ、光起電圧が温度依存性を有する原因を明らかにした。最後に、これらの実験データに基づき光起電圧に関するシミュレーションモデルを提案し、その結果は実験結果とよく一致することを明らかにした。

2. 光起電力効果

PLZTセラミックスは、圧電セラミックスとして実用に供されているPZTセラミックスにLaを添加し

* 原稿受付 1997年3月24日。

^{*1} 東京電機大学大学院 (☎101-8457 東京都千代田区神田錦町2-2)。

^{*2} 正員、東京電機大学工学部。

^{*3} 正員、工業技術院機械技術研究所 (☎305-8564 つくば市並木1-2)。

た機能性セラミックスで、図1に示すようなPLZT素子に波長が365 nm程度の紫外光を照射すると、光起電力効果により両電極間には高い光起電圧が発生する。PLZT素子は通常のPZTと同程度の圧電効果を有しているので、光起電力効果と圧電効果の重畳作用により微小な機械的変位を生じ、この変位を利用して光アクチュエータが実現できる。また、著者らは、このPLZT素子の高い光起電圧をマイクロマシン用の非接触電源(一種の太陽電池)として利用する手法の開発も進めている。このような光アクチュエータあるいは電源として使用する場合、温度変化を考慮したPLZT素子の光起電圧および光ひずみの発生過程は図2のようになる。この図で、温度が変化すると光起電力効果に影響を与えると同時に、温度の時間変化率に関係する焦電効果が発生し、それらの効果が重畳されてPLZT素子には光起電圧が発生する。一方、予備実験によって、圧電効果に与える温度の影響は比較的小さいことを確認しているの、前記の光起電圧、圧電効果および熱変形を考慮すれば、温度が変化したときのPLZT素子に発生する機械的なひずみを推定することができる。光アクチュエータにおいては、こ

Fig. 1 PLZT element

Fig. 2 Photostrictive effect in PLZT element including temperature effect

の機械的ひずみが、また非接触電源としては焦電効果と光起電力効果が重畳された光起電圧が利用される。

そこで、本研究では、PLZT素子の温度依存性を解明する第1段階として、これらの特性に支配的な役割を果たす光起電力効果のみに注目し、その温度依存性を実験的に求めた。

3. 実験方法および実験結果⁽⁵⁾⁽⁶⁾

3.1 実験方法 PLZT素子の光起電力効果に与える温度の影響を実験的に評価するために試作した実験装置の概略を図3に示す。この図で、PLZT素子は、素子を加熱するためのセラミックスヒータの上に固定されており、素子表面に紫外光がほぼ均一に照射される構造になっている。素子に照射される紫外光は、光源(高出力キセノンランプ)から照射される紫外光を、波長が365 nmで光透過率が80%, (365 nm $\pm$ 10 nm)の外側の波長域で光透過率が4%以下の光透過特性を有する極狭帯域バンドパスフィルタによって365 nm程度の波長に単色化し、石英光ファイバを介して照射される。PLZT素子はセラミックスヒータで加熱され、赤外線温度計で素子表面の温度を測定して一定温度になったときを初期状態として、紫外光を照射し、そのとき発生する光起電圧を静電圧測定器で測定した。したがって、実験中はPLZT素子の温度は一定であるので、温度の時間変化率は零であり、焦

Fig. 3 Experimental apparatus

電効果は発生せず、光起電力効果のみの温度依存性を評価できると考えられる。PLZT 素子の組成式は $\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})_{1-x/4}\text{O}_3$ で表示されるが、本研究では最も光ひずみ効果の大きいとされる $x=0.03$, $y=0.52$ の組成をもつ PLZT セラミックスを素材として使用した。本実験で使用した素子は、 PbO , La_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 を組成式に従って秤量、混合し、 900°C で仮焼後、 1250°C で 1 時間焼成して製作された。素子の形状(図 1 参照)は、幅 12 mm、高さ 5 mm、厚さ 2 mm であり、斜線部で示したように対向する両面に銀電極を形成し、 150°C のシリコン油中で 5 分間、20 kV/cm の電界を加えて分極処理を行っている。また、素子の光照射面には鏡面研磨を施している。実験に際しては、あらかじめ PLZT 素子の固定部に紫外光強度センサを取付け、照射面中心部の紫外光強度を 120 W/m^2 に設定した。

3・2 光起電圧のステップ応答実験 PLZT 素子の光起電力効果に与える温度の影響を評価するため、PLZT 素子を加熱し、温度が一定となった状態でステップ状の紫外光を照射し、そのとき PLZT 素子の両電極間に発生する光起電圧を実験的に求めた。これは光起電力効果のステップ応答に相当するものであり、一定となった温度をパラメータにして、その結果を図 4 に示した。いずれの温度でも光起電圧応答はほぼ一次遅れ特性を示すが、温度が上昇するにつれて、発生する光起電圧の定常値が減少する傾向を示した。温度が 110°C の場合には、 25°C の場合の光起電圧の約 60% に低下し、光起電力効果に与える温度の影響が非常に大きいことが明らかになった。なお、紫外光照射による温度変化は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以下であることを確認しており、また異なる光強度においても図 4 とほぼ同様の傾向を

示した。

3・3 PLZT 素子の電気的特性⁽⁷⁾ 著者らは、光起電力効果に関して、図 5 に示すように、光照射によってほとんど時間遅れなく、光強度に關係する定電流源(電流値： i_p)および電気抵抗(R)が発生し、これらと光強度に無關係な電気容量(C)が並列に結合した電気的モデルを提案⁽⁴⁾し、実験的にこのモデルの妥当性を検証した。しかし、提案したモデルは、PLZT 素子の温度が $25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ (ほぼ一定)の条件下で得られたモデルであり、素子の温度が大幅に変化($25 \sim 110^\circ\text{C}$)したときの適用可能性を検討する必要がある。以下では、光起電力効果が温度によって影響を受ける原因を、図 5 に示す電気的モデルに従って実験的に求め、この電気的モデルの適用可能性を評価するため光起電圧のステップ応答実験結果とそのシミュレーション結果の比較検討を行った。はじめに、PLZT 素子の光起電流、電気抵抗および電気容量に与える温度の影響を実験的に求めた。

PLZT 素子に紫外光を照射した状態において、セラミックスヒータで加熱して温度を一定に保ち、図 3 中

Fig. 5 Electrical model for PLZT element

Fig. 4 Step responses of photovoltaic effect in PLZT element at various temperatures (Experiment)

Fig. 6 Characteristics of applied voltage-current in PLZT element

Fig. 7 Temperature dependency of photocurrent

Fig. 9 Temperature dependency of electric resistance

Fig. 8 Temperature dependency of photovoltage

Fig. 10 Temperature dependency of capacitance

の電源を用いて PLZT 素子の両電極間に直流電圧を印加し、そのとき両電極間を流れる電流を KEITHLY 617 プログラマブル・エレクトロメータで測定した。その結果を図 6 に示すが、いずれの温度においても、印加電圧と電流の関係はほぼ直線で近似することができ、PLZT 素子は印加電圧によらず一定の電気抵抗を有することがわかる。この図で、印加電圧が零のときの電流値は光起電流を、また電流値が零のときの印加電圧が光起電圧と考えられる。そこで、PLZT 素子の温度と光起電流および光起電圧の関係を求めると、それぞれ図 7 および 8 のようになる。これらの結果および図 5 に示した光起電力効果の電氣的モデルから電気抵抗(光起電圧/光起電流)と温度の関係を求めると図 9 のようになる。また、非照射時における電気容量と温度の関係を LCR メータを用いて実測すると、図 10 のようになる。光照射した場合、照射光は照射表面のごく薄い層(少なくとも 0.1 mm 以内)で吸収され、その他の層には影響しないと思われるので、使用した PLZT 素子の厚さが 2 mm であることを考慮

すれば照射時の電気容量は非照射時のそれとほぼ同程度であると考えられる。図 10 では、電気容量は温度の上昇にほぼ比例して増大しているが、これは PLZT 素子の比誘電率が温度の上昇とともに増加⁽⁸⁾したことによると思われる。これらの結果をまとめると次のようになる。

(1) 図 7 から、光起電流に与える温度の影響は比較的小さい。

(2) 図 8 から、温度が 30°C のときの光起電圧は約 1000 V であるのに対し、120°C のときのそれは約 600 V に低下し、光起電圧は温度に大きく依存する。

(3) 図 9 から、温度が 30°C のときの電気抵抗は約 14.8 GΩ であるのに対し、120°C のときのそれは約 9.5 GΩ であり、電気抵抗は温度に大きく依存する。

(4) 図 10 から、電気容量は温度の上昇に伴いほぼ直線的に増加する。

これらの結果から、温度の上昇に伴う光起電圧の大幅な低下(図 4, 8 参照)は、温度の増加に伴って減少する電気抵抗に主として起因することが明らかになった。

Fig. 11 Step responses of photovoltaic effect in PLZT element at various temperatures (Simulation)

4. 光起電力効果の シミュレーション結果の考察

図5に示す電気的モデルにおいて i_p , i_R および i_C はそれぞれ光起電流, 電気抵抗および電気容量を流れる電流を, また V_p は光起電圧を表すが, これらの諸量について以下の関係が得られる.

$$i_p = i_C + i_R \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_p = R \cdot i_R \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_C \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1)~(3)を用いて V_p について整理すると,

$$CR \cdot \frac{dV_p}{dt} + V_p = R \cdot i_p \quad \dots\dots\dots (4)$$

のようになる. そこで, 時刻 $t=0$ において PLZT 素子の表面に強度が一定な紫外光が照射された場合を考えると, 図7~10に示した結果から i_p , R , C は温度 T_p (°C) に依存するある一定値 I_p (A), R_p (Ω), C_p (F) になる. したがって, 式(4)は次のようになる.

$$C_p R_p \cdot \frac{dV_p}{dt} + V_p = R_p \cdot I_p \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし, $t=0$ で $V_p=0$ である.

式(5)を V_p について解くと,

$$V_p = R_p I_p \cdot (1 - e^{-t/T}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし, 時定数 $T = C_p R_p$ である.

一方, 図7, 9, 10に示す実験結果から I_p , R_p , C_p と温度 T_p の関係を近似的に求めると, 以下のようになる.

$$I_p = A_I T_p^2 + B_I T_p + C_I \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし,

$$A_I = 0.0023 \times 10^{-9} \text{ A/}^\circ\text{C}^2$$

Table 1 Comparison of results of experiment and simulation

Temperature	Experiment		Simulation	
T_p	$V_p \infty$	T	$V_p \infty$	T
°C	V	sec	V	sec
25	975	1.9	999	1.7
50	869	1.8	878	1.8
70	768	1.7	792	1.8
90	701	1.8	711	1.7
110	631	1.6	626	1.7

$$B_I = -0.3815 \times 10^{-9} \text{ A/}^\circ\text{C}$$

$$C_I = 73.851 \times 10^{-9} \text{ A}$$

$$R_p = A_R T_p^2 + B_R T_p + C_R \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし,

$$A_R = -0.0005 \times 10^9 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}^2$$

$$B_R = 0.0128 \times 10^9 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$$

$$C_R = 15.118 \times 10^9 \text{ } \Omega$$

$$C_p = A_C T_p + B_C \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし,

$$A_C = 0.3475 \times 10^{-12} \text{ F/}^\circ\text{C}$$

$$B_C = 70.118 \times 10^{-12} \text{ F}$$

これらの関係式を用いて, 光強度 120 W/m^2 の紫外光を照射したときの PLZT 素子の光起電圧 V_p のステップ応答を計算により求め, その結果を図示すると図11のようになる. この図より, 電気的モデルによる光起電圧のステップ応答は, いずれの温度においても図4に示した実験結果と同様に一次遅れ特性を示し, 両者はほぼ同様な傾向が認められた. そこで, 光起電力効果の性能指標として, 光起電圧の定常値 V_p^∞ および応答速度の指標である時定数 T を選び, 実験結果(図4参照)とシミュレーション結果(図11参照)を比較すると表1のようになり, 両者はよく一致していることがわかる. 本研究では, PLZT 素子に照射する紫外光の光強度が 120 W/m^2 の場合のみの結果を示したが, 異なる光強度に対するステップ応答の実験結果とそのシミュレーション結果も互いによく一致した. 以上のように, 光起電力効果に関するステップ応答の実験結果はそのシミュレーション結果とほぼ一致したことにより, PLZT 素子の温度が変化した場合でも, 図5に示した電気的モデルが妥当であることが明らかになった.

以上の結果から, 本研究で示した実験方法により I_p , R_p , C_p と温度の関係を近似的に求め, 式(6)を用いれば, 温度を考慮した光起電圧のステップ応答をシミュレーションによりほぼ正確に推定することが可能

になった。

5. 結 言

本研究では, PLZT セラミックスを光アクチュエータあるいは光電源として利用する上で実用性の観点から, PLZT 素子の光起電力効果の温度依存性を実験およびシミュレーションにより解析し, 以下の結論を得た。

(1) 紫外光照射によって発生する光起電圧は, PLZT 素子の温度が上昇するにつれて急激に低下し, 温度に大きく依存する。

(2) 光起電圧の温度依存性は, PLZT 素子の電気抵抗の温度依存性に大きく起因する。

(3) PLZT 素子の温度変化が 25~110°C の範囲においても, 図 5 に示した電氣的モデルが妥当であることを検証し, 本シミュレーション手法により光起電圧の温度依存性をほぼ正確に推定することが可能になった。

文 献

- (1) 中田毅・曹東輝・謝啓裕・山内洋, 光サーボシステムの基礎的研究(光アクチュエータへの寄与), 機論, **57**-42, C(1991), 3228-3233.
- (2) 福田敏男・中村弘文・服部忍・新井史人・松浦英雄, バイモルフ形 PLZT を用いた光サーボシステム, 機論, **61**-586, C(1995), 274-280.
- (3) Yamamoto, K. and Oyama, O., OPTO-FLUIDIC ROBOT CONTROL SYSTEM, *Proc. 3rd Int. Symp. Fluid Power*, (1996), 421-426.
- (4) 中田毅・曹東輝・木村誠・謝啓裕, 光サーボシステムの基礎的研究(PLZT 素子における光起電力効果の電氣的モデル), 機論, **58**-552, C(1992), 2513-2518.
- (5) 中田毅・曹東輝・森川泰・木村誠・謝啓裕, 光サーボシステムの基礎的研究(PLZT 素子を用いたバイモルフ形アクチュエータの動特性推定), 機論, **59**-564, C(1993), 2470-2476.
- (6) 松熊昭憲・中田毅・尾山祐朗, PLZT セラミックスを用いた光アクチュエータの応答速度の改善, 機講論, No. 95-8(I), (1995-8), 323-326.
- (7) 松熊昭憲・中田毅, 光サーボシステムの基礎的研究(PLZT 素子における光起電力効果の温度依存性), 機講論, No. 96-2(1996-6), 1131-1134.
- (8) 岡崎清, セラミック誘電体工学, (1992), 219, 学献社.