

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)

中 田 毅^{*1}, 曹 東 輝^{*1}
木 村 誠^{*2}, 謝 啓 裕^{*2}

Study on Optical Servo System (Modelling for Photovoltaic Effect in PLZT Element)

Takeshi NAKADA, Cao Dong-Hui,
Makoto KIMURA and Hsien Chi-Yu

This paper deals with the design of an electrical model for the photovoltaic effect in a PLZT element to estimate, in advance, the performance of an optical actuator consisting of a PLZT element. The results of the basic experiment on the photovoltaic effect are shown, and they indicate that a parallel circuit including a current source, a resistance and a capacitance may be applicable to an electrical model for the photovoltaic effect, under the consideration of the lumped system. Then, the step response of the photovoltage is obtained theoretically according to the electrical model proposed. Since the theoretical results agree well with the results of the basic experiment, the electrical model proposed can be considered to be valid for practical use. Important aspects of the design of an exact model are also pointed out.

Key Words: Optical Servo System, Optical Actuator, Photovoltaic Effect, PLZT Element, Modeling

1. 結 言

サーボシステムは現在、電気を主体としてコンピュータや各種電子機器を駆使しシステムの特性向上が図られてきたが、一方では電磁ノイズ干渉によるサーボシステムの誤動作が発生するなど今後信頼性、安全性の面から電磁ノイズ対策が重要な課題になろうとしている。光サーボシステムは、このような電磁ノイズ干渉という問題を根本的に解決するばかりでなく、今後システム内で取扱われる情報量の増大化にも適応できるサーボシステムとして、その開発が期待されている。

著者ら⁽¹⁾は、光信号伝送と光センサを利用するという従来の考え方に加えて、光アクチュエータもシステム内に導入するというほぼ完全な光サーボシステムを提案するとともに、光アクチュエータ開発の第一段階としてPLZT素子の有する光ひずみ効果の基本的特性を実験的に明らかにし、PLZT素子は現状、応答速度が遅いという欠点を除けば光アクチュエータへの応

用が可能であることを報告した。光アクチュエータについては、内野ら⁽²⁾⁽³⁾がPLZT素子の光ひずみ効果を主として材料組成の面から評価し、またこの効果を利用した光リレー⁽⁴⁾、微小歩行装置⁽⁵⁾の開発に関する研究の発表などがなされており、PLZT素子を利用した光アクチュエータの基礎的開発が進みつつある。しかし、PLZT素子を利用した光アクチュエータの設計の最適化や素子自体の特性の改良方針を明確にするためには、PLZT素子の有する光ひずみ効果の物理的モデルを確立することが極めて重要であるにもかかわらず、著者らの知る限りでは服部ら⁽⁶⁾の研究を除いて物理的モデルに関する研究は全く見当たらない。服部らは、光起電力効果は一次遅れ系で近似できるという仮定に基づいて光アクチュエータの光応答モデルを構築しており、光起電力効果の具体的モデルについては言及していない。

そこで本研究では、光起電力効果と圧電効果の重畳作用で発生するPLZT素子の光ひずみ効果の物理的モデルを確立する第一段階として、PLZT素子における光起電力効果の電氣的モデルを提案し、そのモデル化の妥当性を実験的に評価することを目的としている。はじめに、光起電力効果に関する基礎実験結果について述べ、ついで実験結果より得られた知見をもと

* 平成3年11月20日 第34回自動制御連合講演会において講演、原稿受付 平成4年1月8日。

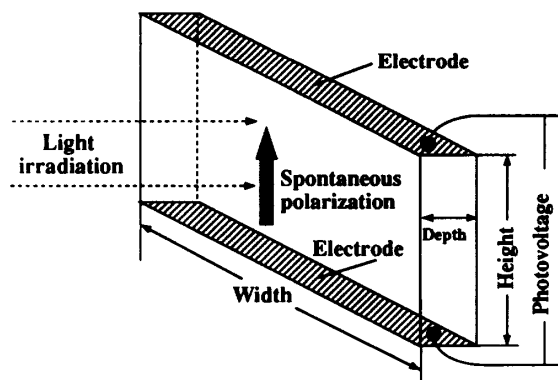
^{*1} 正員、工業技術院機械技術研究所(●305 つくば市並木1-2)。

^{*2} 正員、東海大学(●259-12 平塚市北金目1117)。

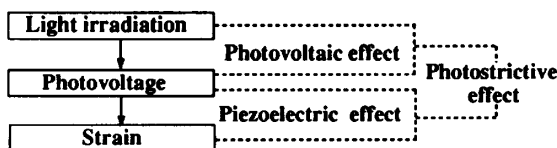
に光起電力効果の電氣的モデルの提案を行っている。最後に、提案した電氣的モデルに関する評価を行い、その妥当性を示すとともに、今後の課題について述べている。

2. 光起電力効果と基礎実験

図1(a)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素子の両電極間には高い起電力が発生する。一方、PLZT素子は圧電材料の一種であり、圧電効果を有しているため光起電力効果との重畳作用により機械的ひずみが発生する。このような現象は光ひずみ効果〔図1(b)〕と呼ばれるが、圧電効果すなわち印加電圧とひずみの



(a) PLZT 素子



(b) 光ひずみ効果

図1 PLZT素子と光ひずみ効果

関係についてはすでに多くの知見⁽⁷⁾が得られている。しかし、PLZT素子の大きな特長である光起電力効果については、その発生機構に対する定説がなく、また光アクチュエータの最適設計に必要な指針もほとんど得られていないのが現状である。そこで本研究では、光起電力効果の発生機構の解明はともかくとして、光アクチュエータの設計の最適化およびPLZT素子自体の特性改良の指針を提示する上で重要な役割を果たす光起電力効果の電氣的モデルの提案を目的としているが、ここでは電氣的モデルを構築する上で重要な基礎実験について述べることにする。

光アクチュエータを設計する際、光起電力効果に関する最も重要な特性は、紫外光の照射によってPLZT素子に誘起される光起電圧の最終的な大きさと応答速度であると考えられるので、このような観点から光起電力効果に関する基礎実験を行い、電氣的モデルの構築を考慮することとした。

図2は、このような基礎実験を行うために試作した実験装置の概要を示す。高出力水銀キセノンランプから出た光は極狭帯域バンドパス特性を有する誘電体多層膜フィルタにより、波長が365 nmの紫外光に単色化され、石英光ファイバを介してPLZT素子に照射される。この紫外光の照射によりPLZT素子の両電極間に誘起される光起電圧および素子を通る電流はそれぞれ表面電位計、微小電流計で測定される。各測定値はメモライザに記録され、コンピュータ処理される。PLZT素子の光照射面における光強度は、図2中のPLZT素子固定部にあらかじめ光パワーメータを取付けて測定した。また、図2中の直流高圧電源はPLZT素子の電気抵抗の特性を測定するための電圧印加装置として用いられた。なお、予備実験により、

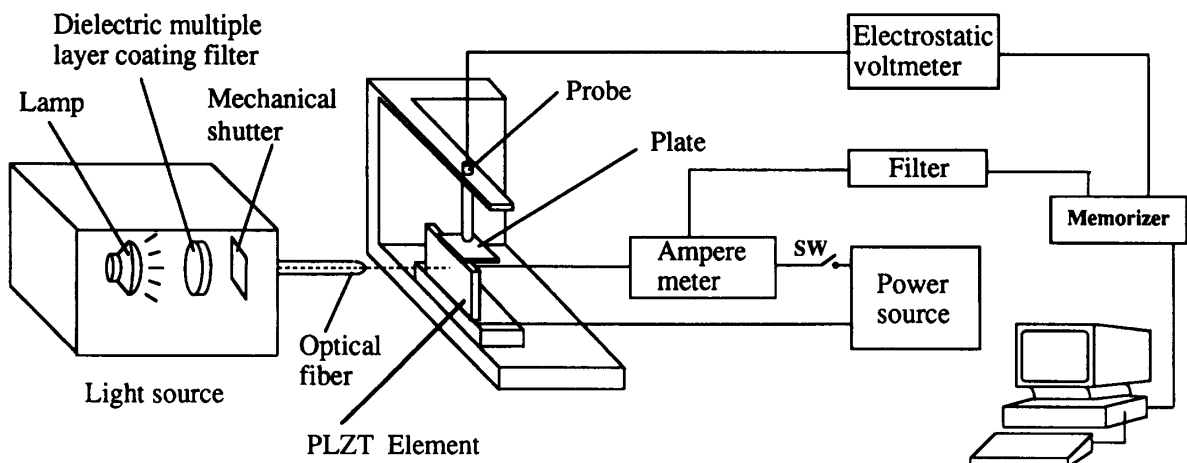


図2 実験装置

PLZT 素子の電気抵抗は $T\Omega$ オーダの大きさであり、また素子を流れる電流は nA オーダの微小電流であることが確認されたので、実験装置の構成と測定系については絶縁抵抗や漏れ電流などに十分配慮して試作され、実験は暗室において行われた。

PLZT セラミックスの組成式は一般に

$$Pb_{1-x}La_x(Zr_yTi_{1-y})_{1-x/4}O_3$$

で表されるが、本研究では $x=0.03$, $y=0.52$ の組成を持つセラミックスを素材とする PLZT 素子を試作⁽¹⁾し、実験に供した。試作した PLZT 素子の主要諸元⁽¹⁾を以下に示す。

- (1) 形状：高さ 5.0 mm, 幅 12 mm, 厚さ 0.5 mm (図 1 参照)
- (2) 焼成温度：原粉の仮焼温度 900°C, 素子焼成温度 1200°C (1 時間)
- (3) 分極条件：分極処理電界 20 kV/cm, 雰囲気シリコン油中 150°C-5 分間

さて本研究では、モデル化の第一段階として光起電力効果の電氣的モデルを集中定数系で考えることとし、そのモデルの全体構成を推定するため、はじめに PLZT 素子への印加電圧と素子を流れる電流の関係(静特性)を、ついで光起電力効果に関するステップ応答を実験的に求めた。

図 3 は PLZT 素子への直流印加電圧と素子を流れる電流の測定結果を示す。本実験では、PLZT 素子の表面に一定の強度の紫外光を照射した状態において、図 2 中の直流高压電源を用いて PLZT 素子の両電極間に種々の直流電圧 (V) を印加し、そのとき両電極間を流れる電流 I を微小電流計により測定している。図 3 によれば、いずれの光強度の場合にも V と I の関係はほぼ直線で近似することができ、光強度が一定で

あれば PLZT 素子は印加電圧 V によらず一定の電気抵抗 R を有していることがわかる。そこで、この直線の傾きから電気抵抗 R を求め、光強度 L との関係を図示すると図 4 のようになり、光強度が大きくなるにつれ、電気抵抗 R は急激に小さくなる傾向を示す。一方、図 3 において印加電流 $V=0$ のときの電流 I_p は短絡電流であり、これは光照射により PLZT 素子に発生した電流、すなわち光起電流と考えられる。この光起電流 I_p と光強度の関係を図示すると図 5 のようになり、 I_p は光強度 L にほぼ比例して大きくなる。

次に、光起電力効果に関するステップ応答を求めるに当たっては、図 2 中の光源に設置された機械的シャッターを用いて光を遮断した状態を初期状態とし、ある時刻 ($t=0$) に機械的シャッターを瞬間的に全開して紫外光を PLZT 素子に照射した後に、PLZT 素子

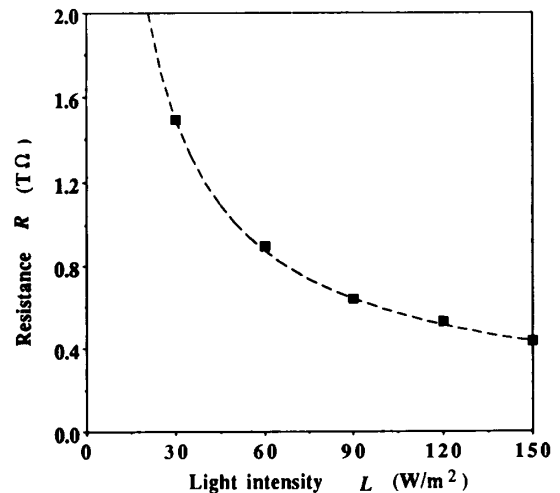


図 4 光強度と PLZT 素子の抵抗の関係

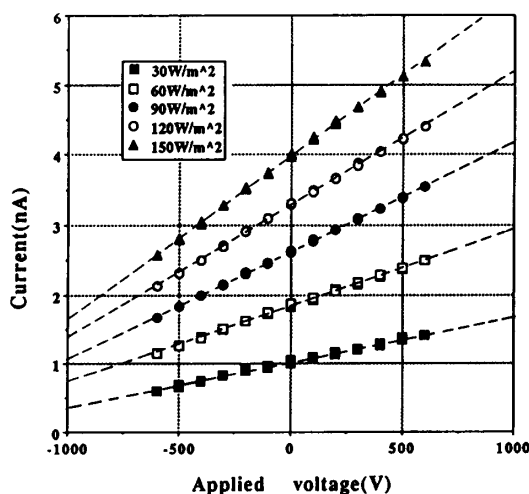


図 3 PLZT 素子の印加電圧-電流特性

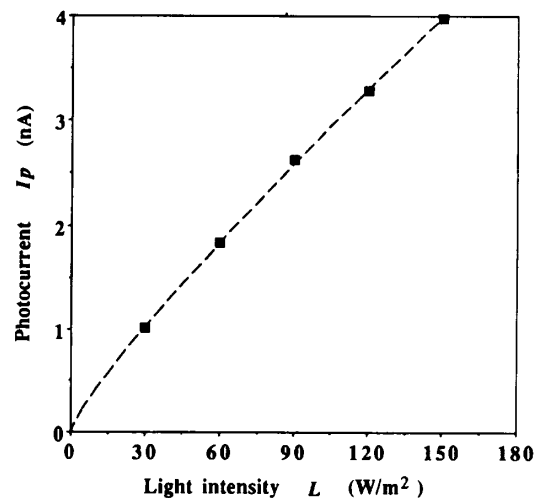


図 5 光強度と光起電流の関係

の両電極間に発生する光起電圧および PLZT 素子を通る電流（光起電流）の時間経過を測定した。図 6 は、光強度をパラメータにした光起電圧のステップ応答の実測結果を示す。図から明らかなように、光起電圧はいずれの光強度の場合にもほぼ一次遅れの特性を示している。光強度と光起電圧の定常値 $V_{p\infty}$ および、応答速度の目安である時定数 T を PLZT 素子の性能を表す指標に選び、光強度との関係を整理すると表 1 のようになる。この表によれば、PLZT 素子の光起電圧の定常値の大きさは光強度 L の増加につれて次第に大きくなり、 $L=120\sim 150$ (W/m^2) において $V_{p\infty}=1.65\times 10^3$ (V) の値でほぼ飽和する傾向を示している。また、時定数 T は光強度 L にほぼ反比例して小さくなる傾向を示しており、従来より指摘されてきた PLZT 素子の応答速度が遅いという欠点⁽⁴⁾をある程度解消する対策の一つとして、光強度を高めるとい

うことが有力な方策であるという重要な知見が得られた。一方、PLZT 素子に照射したとき発生する光起電流のステップ応答は、図 5 は割愛するが、光強度 L が $30\text{ W}/\text{m}^2\sim 150\text{ W}/\text{m}^2$ 範囲内では時定数約 14 ms を持つ一次遅れ特性を示し、図 6 に示した光起電圧のステップ応答に比べて極めて速応性が高いことがわかった。

3. PLZT 素子の電気的モデルの提案

2 章で述べた基礎実験結果をもとに、PLZT 素子の電気的モデルを構築する上で重要な知見を整理すると次のようになる。

(1) 光起電力効果は一種の光励起による電荷の移動が原因と考えられること、および図 5 に示した結果から、PLZT 素子は光強度に依存する定電流源を有する。

(2) 光起電流のステップ応答の時定数は約 14 ms であるが、光起電圧のステップ応答のそれは 8 s 以上であることから、現状では光照射に対して遅れない定電流源と考えることができる。

(3) PLZT 素子は、電圧には依存しないが、光強度に依存する一定の電気抵抗を有する（図 3, 4 参照）。

(4) PLZT 素子は強誘電体であるので電気容量を有する。

このような知見から、PLZT 素子における光起電力効果の基本的な電気的モデルを推定すると、図 7 に示すように、定電流源、コンデンサ、抵抗が並列に結合した電気的モデルが妥当であると考えられるので、以下では図 7 に示すような電気的モデルについて検討する。なお、本研究では $x=0.03$, $y=0.52$ の組成を持つ PLZT セラミックスを扱っているが、異なる組成の場合でも光起電流、電気抵抗、電気容量の大きさが変化するのみで、モデルの構造には影響を及ぼさず、図 7 は PLZT 素子における一般的な電気的モデルと考えられる。このことは、本研究とは異なる組成の PLZT セラミックス ($x=0.012$, $y=0.40$) に関する予備実験でも確認されている。

図 7 において、 C および R はそれぞれ PLZT 素子の電気容量および電気抵抗の大きさを、 i_p , i_c , i_R はそれぞれ光起電流、コンデンサおよび電気抵抗を流れる電流を、また V_p は電気抵抗両端の電位差、すなわち PLZT 素子の両電極間に発生する光起電圧を表すとすれば、この電気的モデルについて以下の関係が得られる。

$$i_p = i_c + i_R \quad \cdots (1)$$

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

表 1 光強度と光起電力効果の性能指標（実験）

Performance indexes		$V_{p\infty} (\times 10^3 \text{ v})$	$T \text{ (sec)}$
Light intensities (W/m^2)	30	1.53	34.0
	60	1.57	19.5
	90	1.62	13.5
	120	1.65	10.5
	150	1.65	8.5

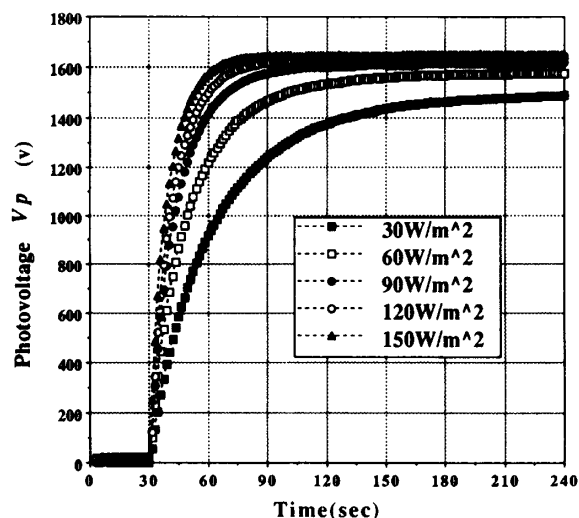


図 6 PLZT 素子における光起電圧のステップ応答（実験）

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

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、 $t=0$ において PLZT 素子表面に一定の光強度 L の紫外光が照射された場合を考えると、知見(2)でのべたように、光起電流 i_p は L に依存するある一定値 I_p になる。したがって、式(4)は次のようになる。

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

ただし、 $t=0$ で $V_p=0$

式(5)を V_p について解くと、

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

ただし、 $T=CR$ (時定数) である。

一方、図4、5より R と L 、 I_p と L の関係を近似的に求めると、それぞれ次のようになる。

$$R = 2.06 \times 10^{13} L^{-0.77} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$I_p = 5.72 \times 10^{-11} L^{0.85} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、コンデンサの電気容量 C は、PLZT 素子に一定の光強度の紫外光を照射した状態で、LCR メータ (HP, 4262 A) で測定したが、実験範囲内 ($L=30 \sim 150 \text{ W/m}^2$) では光強度によらず C の大きさはほぼ 20 pF であった。

4. 電気的モデルの評価と考察

3章で求めた式(6)～(8)および電気容量の実測値 ($C=20 \text{ pF}$) を用いて光強度 L の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た結果 (以下理論結果) を図示すると図8のよ

うになる。

図8の応答に注目すると、いずれの光強度においても理論的なステップ応答はほぼ一次遅れ特性を示しており、図6で示した実験結果と概略一致していることがわかる。そこで、光起電力効果の性能指標 ($V_{p\infty}$ および T) について実験結果 (図6) と理論結果 (図8) を整理すると、表2のようになる。

光照射によって発生する光起電圧の定常値 $V_{p\infty}$ は、理論値のほうが実験値よりやや大きい値を示しているが、その誤差は最大で6%程度であり、ほぼ良好な一致と考えられる。一方、速応性の指標である時定数 T については、いずれの光強度においても理論結果は実験結果より小さな値、すなわち理論結果のほうが速応性が高い傾向を示しており、その誤差も15%～27%程度で、前述の光起電圧の定常値 $V_{p\infty}$ の場合に比べて誤差が大きくなっている。この誤差の大きい原因は、時定数 T は $T=CR$ [式(6)参照] で与えられるが、光起電圧の定常値 $V_{p\infty}$ [式(6)参照] の理論結果と実験結果がよく一致することから電気容量 C の測定誤差によるものと考えられる。さらに電気的モデルの構成自体についても今後検討する必要があるだろう。しかし、本研究で提案した電気的モデルは、PLZT 素子自体の特性改良と PLZT 素子を利用した光アクチュエータの設計に関する指針を得るという目的に対しては、以下のような重要な知見が得られる。すなわち、

(1) PLZT 素子を光アクチュエータに利用する場合、できるだけ $V_{p\infty}$ が大きく、 T が小さいことが望まれるが、そのためには式(6)から明らかなように光起電流が大きく、電気抵抗および電気容量は小さく

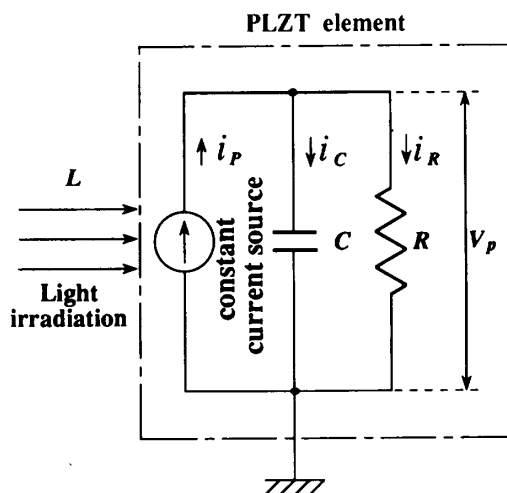


図7 PLZT 素子の電気的モデルの提案

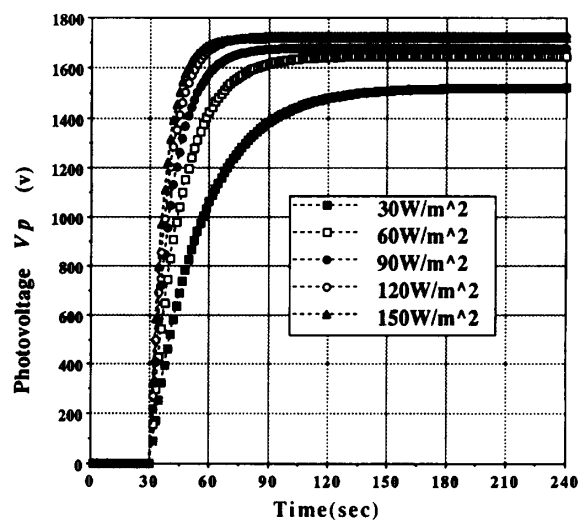


図8 PLZT 素子における光起電圧のステップ応答 (電気的モデル)

表 2 光起電力効果の性能指標の比較 (実験と理論)

Performance indexes		$Vp_{\infty} (\times 10^3 \text{ v})$		$T \text{ (sec)}$	
		Experiment	Theory	Experiment	Theory
Light intensities(W/m^2)	30	1.53	1.52	34.0	24.8
	60	1.57	1.64	19.5	15.0
	90	1.62	1.68	13.5	10.0
	120	1.65	1.73	10.5	8.7
	150	1.65	1.72	8.5	7.2

するという指針のもとに PLZT 素子の特性を改良すべきである。

(2) PLZT 素子を利用した光アクチュエータの動特性をほぼ推定することができる。

本研究では、より大きな変位を得るという立場から比較的大きな光強度の場合について光起電力効果の電気的モデルについて検討したが、今後はマイクロメカニズムなどの光アクチュエータを対象にして、本研究で提案した電気的モデルの妥当性をより小さな光強度において検証する必要があると同時に、光強度に対する光起電流、電気抵抗および電気容量の大きさに与える PLZT 素子の形状の影響を明確にすることが今後の課題になる。

5. 結 言

本研究では、PLZT 素子を利用した光アクチュエータの設計の最適化や素子自体の特性の改良指針を明確にするため、PLZT 素子における光起電力効果に関する基礎実験と電気的モデルの提案を行い、以下の結論を得た。

(1) 従来指摘されてきた PLZT 素子の応答速度が遅いという欠点を大幅に改善する対策として、光強度を高めることが有力な方策である。

(2) 光起電力効果の基本的な電気的モデルとして、光強度に依存する定電流源、電気抵抗および電気

容量からなる並列回路が妥当であると考えられる。

(3) 提案した電気的モデルに関するステップ応答の理論結果は実験結果とほぼ一致し、その妥当性を検証した。

また、提案した電気的モデルの問題点および今後の検討課題について言及した。

終りにあたり、本研究は工業技術院官民連帯共同研究制度のもとで実施されたことを付記し、関係者に謝意を表する。

文 献

- (1) 中田・ほか 4 名, 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, 57-542, C(1991), 3228.
- (2) Uchino, K., ・ほか 2 名, High Voltage Effect in PbTiO_3 -Based Ceramics, *J. Appl. Phys.*, 21-12(1982), 1671-1674.
- (3) Tanimura, M. and Uchino, K., Effect of Impurity Doping on Photostriction in Ferroelectric Ceramics, *Sensors and Materials*, 1(1988), 47-56.
- (4) Uchino, K. and Aizawa, M., Photostrictive Actuator using PLZT Ceramics, *J. Appl. Phys.*, 24-3(1985), 139-141.
- (5) Uchino, K., Micro Walking Machines using Piezoelectric Actuators, *J. of Rob. Mech.*, 1-1(1989), 124-127.
- (6) 服部・ほか 2 名, 光圧電素子アクチュエータの基礎的研究, 日本ロボット学会誌, 9-6(1991), 692.
- (7) 内野, 圧電/電歪アクチュエータ, (1988), 103-202, 森北出版.