

論文の内容の要旨

論文題目

誘電率変化を利用したセルフセンシング

圧電アクチュエータ制御に関する研究

(Self-sensing Control of Piezoelectric Actuator Using Permittivity Change)

氏名 池田 英幸

1. 研究の背景

圧電アクチュエータは、電圧を入力することにより、変位を得ることが出来るアクチュエータである。このとき、圧電アクチュエータに入力される電圧値と、それによって得られる変位は、線形な関係にはならず、また1対1でも対応しない。これは、圧電アクチュエータに見られる、ヒステリシスと呼ばれる履歴現象によるものである。そこで、圧電アクチュエータを精密位置決めに利用する際には、位置センサを用いてフィードバック制御を行う必要がある。しかしながら、フィードバック用のセンサの存在は、製造コストを増大させると共に、位置決めシステムを複雑にする原因となっている。そこで、本研究においては、圧電アクチュエータ自身を変位センサとして使用することにより、フィードバック用のセンサを用いることなく精密に制御する「セルフセンシング」技術の可能性についての検討を行った。

この研究で行ったセルフセンシングでは、圧電アクチュエータを駆動する際、圧電アクチュエータ自身の静電容量が変化することを利用した。この静電容量の変化は、圧電アクチュエータを構成する圧電セラミックスの誘電率が変化することに起因していると考えられ、さらにこの誘電率の変化は、圧電セラミックス内部の結晶構造変化に起因していることが予想される。この研究では、圧電アクチュエータへの電圧印加時に起こると考えられる圧電セラミックス内部の構造変化と誘電率変化の関係を、シミュレーションにより明らかにすることを試みた。

また、このセルフセンシング技術を高精度化するための検討と、様々な圧電アクチュエータの精密位置決め制御の応用の可能性の検討を行った。

先行研究では、圧電アクチュエータが駆動電圧の印加により伸縮する際、圧電アクチュエータに低電圧・高周波の信号を同時に印加し、この信号と同一周波数の電流を測定することにより、圧電アクチュエータのインピーダンスをモニタした。このときインピーダンスから計算される圧電アクチュエータの静電容量と、圧電変位が1対1で対応するという関係を見出し、圧電アクチュエータの静電容量をセンサとして利用したセルフセンシング制御駆動に成功している。

しかしながらセルフセンシングによる圧電アクチュエータの制御の精度は、約 $50\mu\text{m}$ の動作範囲において、特定の誘電率における変位の誤差は、 $\pm 2\mu\text{m}$ 程度あり、従来の位置センサを利用したフィードバック制御に比べて十分とは言えない。工業においてセルフセンシングを実用化するに当たっては、精度の向上が不可欠となる。また様々な構造の圧電アクチュエータにおいて、セルフセンシングが使用可能かの検討も必要である。

このようなことを背景として、本研究においては、①圧電アクチュエータの静電容量と変位の関係の考察、②圧電アクチュエータによるセルフセンシング制御の高精度化の検討、③圧電アクチュエータを用いた位置決めステージへのセルフセンシング応用の可能性の検討を行うこととした

2. 圧電アクチュエータの変位と誘電率の関係を導出するシミュレーション

圧電アクチュエータにおいて、印加する電場と変位の間にはヒステリシスが見られるが、印加電場と誘電率の間にもヒステリシスが見られることが実験的に確認された。このとき、誘電率を横軸に、変位を縦軸にプロットすると、直線的な関係が確認され、これを利用してセルフセンシングが可能であることが分かった。本研究では、この直線的な関係がどのような時に得られ、どのような時に誘電率を用いたセルフセンシングが可能であるかを考察するため、モデルを用いて、シミュレーションを行った。ソフト系 PZT を用いた圧電アクチュエータでは、電場の印加に伴って、格子定数が変化することによるイントリンシック変位と共に、結晶構造に変化が起こるために起こるエクストリンシック変位が加わることで、ハード系 PZT よりも大きな変位が起きる。このエクストリンシック変位が、電場の印加に対してヒステリシスを持っていることが、圧電アクチュエータ全体の変位がヒステリシスを持つ原因と考えられる。圧電変位に伴って変化する誘電率もまた、ヒステリシスを持つことが確認されたが、このヒステリシスもエクストリンシック変位同様、結晶構造の変化が電場に対して不可逆に起こることに起因すると考えると、誘電率と圧電変位の間に高い相関関係が得られることに説明がつく。そこで、圧電アクチュエータの変位、および誘電率が、共に圧電セラミックスの結晶構造変化に依存すると考え、結晶構造をモデル化し、電場の印加に伴って変化する圧電セラミックス結晶内の分極方向の分布を仮定することで、実験データを再現できるか検証を行った。シミュレーションの結果、マイナーループにおいて、圧電変位と誘電率が印加電場に対してヒステリシスを持つ場合でも、誘電率と圧電変位の関係は直線的となることが確認でき、実験で得られた現象と一致した。

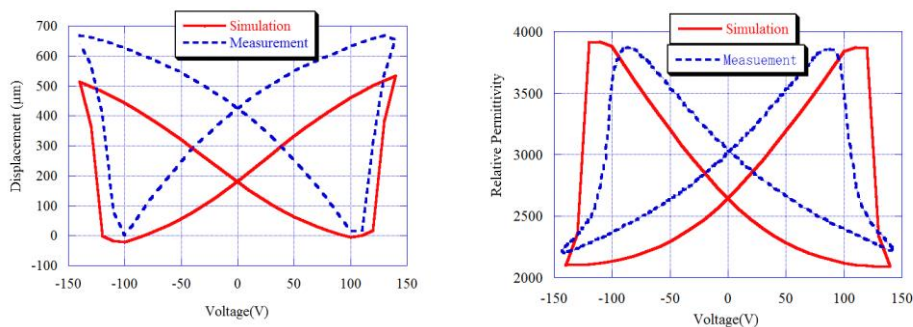


fig1. メジャーリングにおける変位（左）と誘電率（右）のシミュレーションと実験値

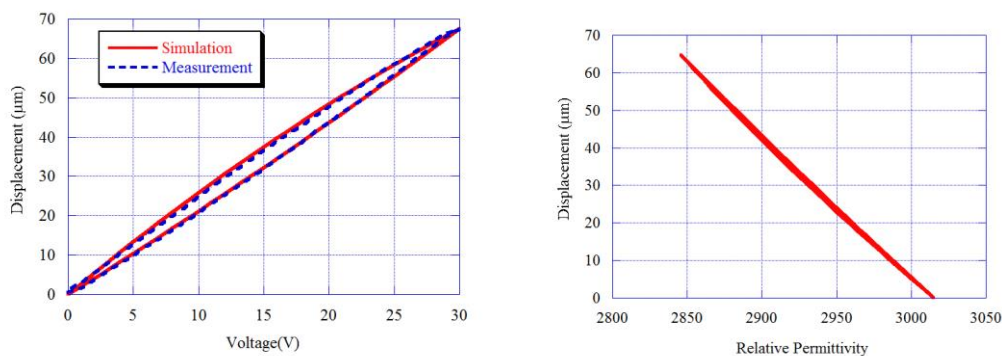


fig2. マイナーループにおける変位の実験値とシミュレーション（左）およびシミュレーション

3. バイモルフ圧電アクチュエータのセルフセンシングによる高精度制御

前項で述べたシミュレーションの結果を元に、バイモルフアクチュエータのセルフセンシング制御の高精度化の実験を行った。バイモルフ圧電アクチュエータを駆動すると、それを構成する2枚の圧電セラミックスそれぞれの誘電率に変化が生じる。この誘電率変化をモニターするため、圧電アクチュエータに駆動用の電圧 (0~40V、0.1Hz) を印加すると同時に、誘電率検波用の高周波で低電圧の信号 (1V_{p-p}、100kHz) も印加し、この検波用電圧と同じ周波数の電流を、クランプ型電流計とロックインアンプを用いて測定することにより、圧電アクチュエータのインピーダンス変化から誘電率を算

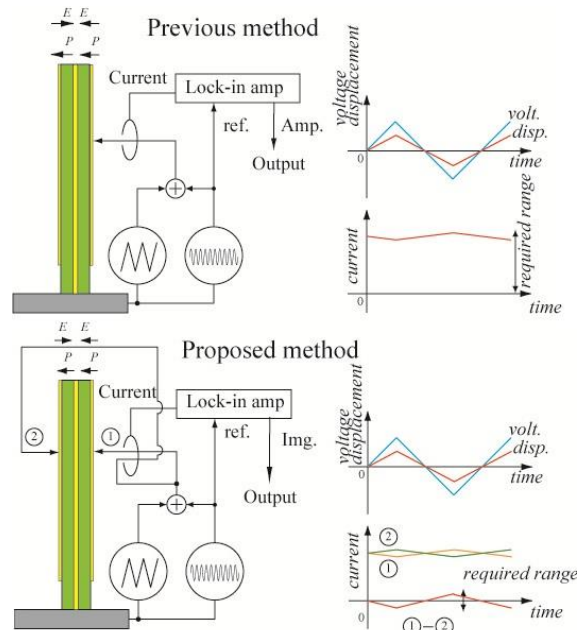


fig. 3 従来の誘電率モニタと差分電流モニタ

出した。本研究では、このときにバイモルフの2枚のアクチュエータに流れる誘電率検波用電流の差分検出を試みた。これにより、検出する電流の変化量を2倍にすると同時に、2枚のセラミックスにおける、駆動用電圧に依存しない静電容量による電流を相殺させることで、ロックインアンプの測定レンジを小さくして高感度検出することができる。

このとき、fig. 3 の上の図の方法で電流値から求めた比誘電率と変位を測定すると、圧電アクチュエータ駆動時の2枚のセラミックスの誘電率と変位の関係はそれぞれ fig. 4 の左右の図のようになった。

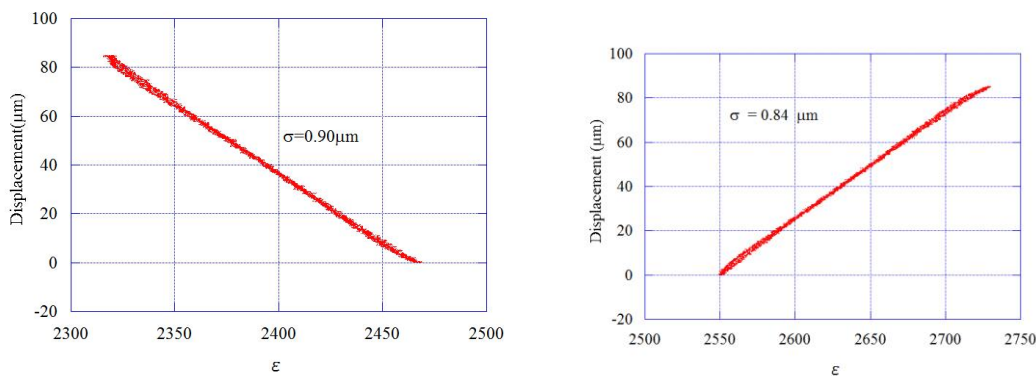


fig. 4 バイモルフアクチュエータ駆動時の2枚のセラミックスの誘電率変化

このグラフを最小二乗法で直線近似し、その近似直線と実測値との標準偏差を求めると、それぞれ $\sigma = 0.90 \mu\text{m}$ 、 $\sigma = 0.84 \mu\text{m}$ となった。この値は、圧電アクチュエータの誘電率を位置センサとして使用する時の位置決め誤差の限界を示している。そこで、fig. 3 の下の図にみられる差分測定を行い、2枚のセラミックスの比誘電率の差を横軸に、変位を縦軸にとると、図5のようになった。

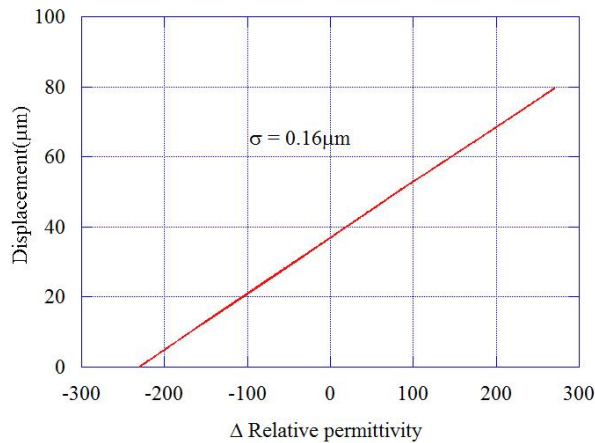


fig. 5 差分電流測定時の2枚のセラミックスの比誘電率の差と変位の関係

fig. 5において、比誘電率と圧電変位に非常に良好な線形関係が得られた。このグラフを最小二乗法で直線近似し、標準偏差を求めると、 $\sigma = 0.16 \mu\text{m}$ となった。これは動作レンジ $80 \mu\text{m}$ に対して、0.4%に相当する。

この手法を用いて、圧電バイモルフの高分解能制御を試みた。fig. 5は制御用DSPによる制御の概略図である。位置のフィードバック信号として、ロックインアンプの出力を用い、位置を推定した。DSP内で推定位置と目標位置との差分を計算し、PI制御した出力信号は、アンプを介して、アクチュエータに接続した。制御目標位置は、0から $80 \mu\text{m}$ まで、 $10 \mu\text{m}$ きざみの階段状とし、0.5秒で1ステップ進むように設定にした。

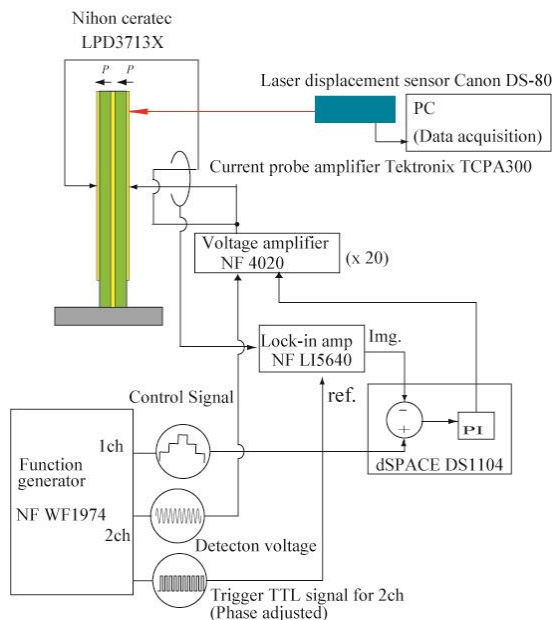


fig. 6 差分電流制御の概略図

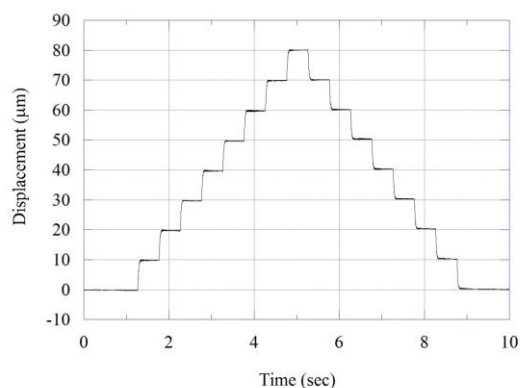


fig. 7 差分電流制御の結果

fig. 7は、 $0 \mu\text{m}$ から $80 \mu\text{m}$ までの制御結果である。どの制御位置においても、目標値 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 以内に入っていることが確認できた。

4. まとめ

本研究により、圧電アクチュエータの誘電率と変位の関係が直線的になることがシミュレーションにより示された。またこの方法を用い、バイモルフアクチュエーターを用いて差分電流をモニタして制御を行うことで高精度な制御が可能になることがわかった。