

# 論文の内容の要旨

## 論文題目 形状記憶圧電アクチュエータに関する研究 (Shape Memory Piezoelectric Actuator)

氏名 門田 洋一

### 1. はじめに

一般に圧電アクチュエータの変位は電界に対して線形であるため(実際には若干のヒステリシスを持つ)、その変位を維持するためには DC 電圧を印加し続ける必要がある。これは消費電力等の点から問題となることがある。そこで本論文では、通常の圧電アクチュエータと同様に電圧印加によって駆動する一方、印加電圧を 0V にしてもその変位を維持させる“形状記憶圧電アクチュエータ”を提案している。形状記憶圧電アクチュエータの原理として“電界インプリントを利用する手法”、“非対称電圧を利用する手法”の 2 つを提案し、それぞれの特性評価を行った。後者の原理について、X 線回折や原子間力顕微鏡を用い、微視的な原理の解明を行った。また、歪みのメモリ効果の微視的な原理から、Preisach Model と呼ばれるモデルの改良を行い、現象の理解を深めた。最後に提案した形状記憶圧電アクチュエータの設計指針について簡単に述べた。

### 2. 電界インプリントを用いた形状記憶圧電アクチュエータ

形状記憶圧電アクチュエータの基本原理は、歪みのメモリ効果である。通常、強誘電体の分極特性はヒステリシスを有し(DE ヒステリシス)、メモリ効果を持ち不揮発性メモリ等に用いられている。一方で強誘電体の電界誘起歪みにはメモリ効果はないとされる。これは分極反転時の歪みのヒステリシス(バタフライ曲線)が電界に対して対称となるためである。しかし、電界インプリントと呼ばれる現象が生じるとこの特性が電界に対して非対称になると考えられる。原理の模式図を図 1 に示す。電界インプリントは強誘電体に内部電界が生じたように見える現象で、これにより通常 D-E ヒステリシスは電界軸方向にシフトする。この時同様にバタフライ曲線も電界軸方向にシフトすると予測され、これにより、バタフライ曲線も電界 0 の状態で異なる 2 つの値を持つようになり、歪みにメモリ効果が生じる。

形状記憶圧電アクチュエータはこの 2 つの歪みの安定点を利用するため、パルス電圧によって駆動することができる。正のパルス、負のパルスを交互に印加し分極反転させることで、印加電圧 0V の状態で異なる変位状態を実現できる。

実際に、市販のソフト系 PZT ユニモルフアクチュエータを用いて実験を行った。アクチュエータに電界インプリントを生じさせるため、高電圧下で大きな直流電界を印加する処理を行った。その後アクチュエータをパルス電圧で駆動した結果を図 2 に示す。アクチュエータが印加電圧が 0V の状態で異なる変位を持ち、結果、その差分の変位 200 $\mu\text{m}$  をメモリできる事が確認された。しかし、製作した形状記憶圧電アクチュエータをパルス電圧で連続駆動したところ、 $10^3$  回程度でメモリ量が最大値の 60% 程度まで低下することが分かった。これは連続駆動によって生じた電界インプリントが減少することが原因であると考えられる。

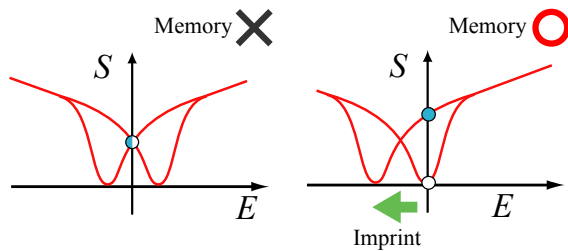


図 1. 電界インプリントによる歪みのメモリ効果

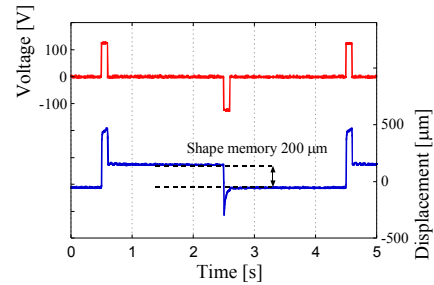


図 2. パルス電圧駆動

### 3. 非対称電圧駆動による形状記憶圧電アクチュエータ

形状記憶圧電アクチュエータの新たな原理として、非対称電圧駆動によるメモリ効果を提案した。本原理では電界インプリントを必要とせず、疲労特性の改善が期待される。非対称電圧駆動による歪みのメモリ効果について図 3 に示す。通常は対称なバタフライ曲線も、印加電圧を非対称にすることで非対称となり、印加電圧 0V の点で異なる 2 つの歪みを持つ、すなわち歪みのメモリ効果を持つというものである。

市販のユニモルフアクチュエータを用いて形状記憶圧電アクチュエータの駆動実験を行ったところ、非対称の電圧振幅の駆動により、バタフライ曲線が非対称となり、歪みのメモリ効果が生じることが確認できた。また非対称な電圧振幅を持つパルス電圧によって、形状記憶圧電アクチュエータとしての駆動を確認した。新しい原理を用いて製作した形状記憶圧電アクチュエータの疲労特性について図 4 に示す。電界インプリントを用いたアクチュエータの場合メモリ量が早期に大きく低下しているのに対して、新しい原理のアクチュエータは  $10^6$  回まで駆動し、その際のメモリ量は最大値の 80% 程度を維持した。この結果から、非対称電圧駆動による形状記憶圧電アクチュエータは良好な疲労特性を示すことが確認された。

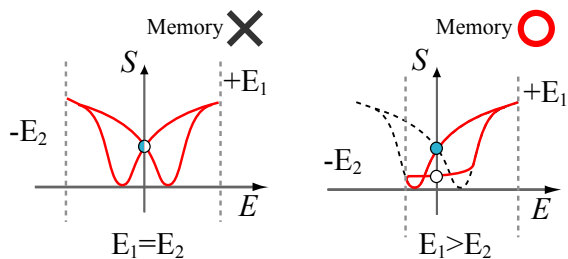


図 3. 非対称電圧によるメモリ効果

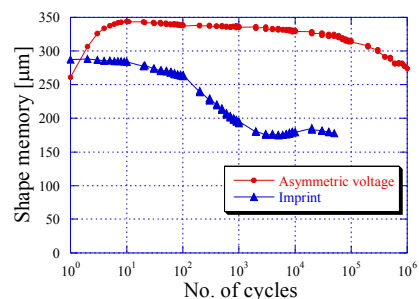


図 4. 連続駆動による疲労特性

#### 4. ドメインスイッチングによる歪みメモリの微視的研究

非対称電圧駆動に依る歪みのメモリ効果は、マイクロには非 180° ドメインのドメインスイッチング (DS) に起因すると考えられる(図 5). そこで、X 線回折を用いて、非対称電圧駆動時の各ドメインからの回折強度を測定し、その変化をマクロな歪みと比較した. その結果、マクロな歪みと X 線回折から計算されたドメインの体積分率の関係には図 6 に示すような良好の線形関係があり、また定量的にも一致した. これらの結果から、非対称電圧駆動に依る歪みのメモリ効果がマイクロには非 180° ドメインの DS に起因することが確認された.

また、圧電応答顕微鏡を用いて、非対称電圧駆動下のセラミックスのマイクロなドメイン状態を観察した. この結果からも非対称電圧駆動によって、非 180° ドメインの割合が変化していることが確認された.

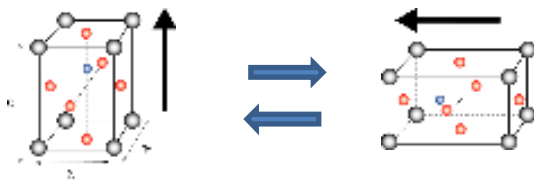


図 5. ドメインスイッチングによる歪み

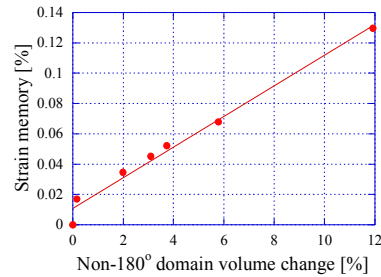


図 6. マクロな歪みメモリとドメインの体積変化

#### 5. Preisach Model によるモデル化

歪みメモリのマイクロな原理が非 180° ドメインの DS であることが明らかになった. そこで非 180° ドメインの DS によるマイクロな歪みから、実際のマクロな歪みを扱うモデルを考案した. モデル化にはヒステリシスのモデリング手法のひとつである Preisach Model を用いた. Preisach Model は通常、強磁性体のヒステリシスのモデリング等に用いられるもので、対象がヒステロンと呼ばれる微小な構成要素の集合であるとして扱う. ヒステロンは矩形のヒステリシス特性を持った要素で、この閾値の分布がマクロな特性を与える. しかし、通常の Preisach Model の場合、強誘電体の分極状態が+または-の 2 状態しか扱えず、このままでは、非 180° ドメインは扱えない. そこで新たに強誘電体の非 180° ドメインの DS を含んだヒステロンを考案した. 図 7 に通常のヒステロン及び考案した新しいヒステロンを示す. 従来のヒステロンでは 2 値しか扱えなかったが、考案したヒステロンでは+、0、-の 3 状態を扱えるため、非 180° ドメインの DS も扱うことができる. 実際に考案したモデルを用いて強誘電体の電界誘起歪みを計算した例を実験値と共に図 8 に示す. 計算値と実験値が良く一致することが分かる. 提案した新しいモデルにより、強誘電体の電界誘起歪みのモデル化を行い、これにより非対称電圧下の歪み特性の計算が可能となった.

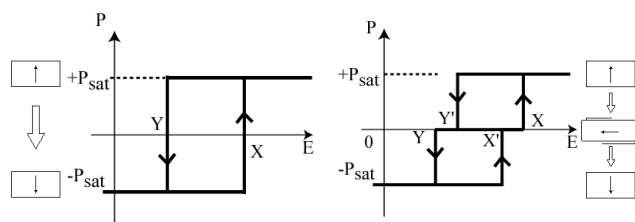


図 7. 従来のヒステロン(左)と考案したヒステロン(右)

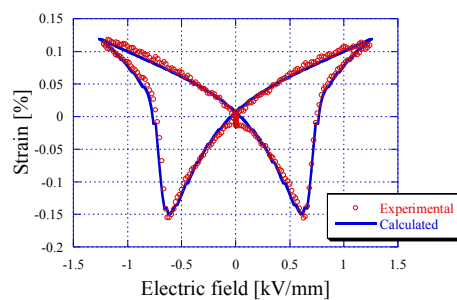


図 8. 歪みの実験結果及び計算結果

## 6. 形状記憶圧電アクチュエータの設計指針

最後に得られた知見を元に形状記憶圧電アクチュエータの設計指針について簡単に示した。形状記憶圧電アクチュエータの原理として“電界インプリントを用いたもの”，“非対称電圧駆動を用いたもの”の2つを提案したが，疲労特性の観点から後者が有望であると考えられる。後者について，マイクロには非  $180^\circ$  ドメインの DS が原理であることが示された。そこで，形状記憶圧電アクチュエータに適した材料について考察した。結果について表 1 にまとめる。圧電材料はその特性からソフト系とハード系に大別されるが，ドメインの動き易さ等の理由から形状記憶圧電アクチュエータに適するのはソフト系である。また，結晶系について，代表的な例として正方晶系と菱面体晶系を比較した。非  $180^\circ$  ドメインの DS によるマイクロな歪みは正方晶系が大きく有利である。一方でセラミックス全体における非  $180^\circ$  ドメインの DS の割合は菱面体晶系が有利である。しかし，正方晶系で DS が急峻に生じるのに対して，菱面体晶系では DS がブロードに生じる。これらを考慮すると，形状記憶圧電アクチュエータに適した結晶系は正方晶系であると考えられる。

通常市販されている強誘電体，圧電材料は，主に圧電定数が最大化するように設計されたものである。これに対して，形状記憶圧電アクチュエータでは，高い圧電定数はむしろ避けるべきで，重要なのは抗電界付近において非  $180^\circ$  ドメインの DS が急峻に生じることである。従って，従来は低い圧電定数のため棄却されてきた材料が形状記憶圧電アクチュエータに適した材料となることも考えられる。

表 1. 形状記憶圧電アクチュエータに適した材料特性

種類	結晶系
○ソフト系	○正方晶系
×ハード系	×菱面体晶系

## 7. まとめ

本論文では，電圧 0V でも変位を維持することができる形状記憶圧電アクチュエータを提案し実証した。提案した新アクチュエータは通常の圧電アクチュエータと同様の材料，構造を用いながら従来とは異なる原理で駆動させる。新アクチュエータの原理はマイクロには非  $180^\circ$  ドメインの DS に起因する事を示し，それに基づきモデル化を行った。提案したモデルは形状記憶圧電アクチュエータだけでなく，一般的な強誘電体の歪みのモデリングに有用なものと考えられる。また，提案した新アクチュエータについて，その設計指針を示した。