

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-108601

(P2017-108601A)

(43) 公開日 平成29年6月15日(2017.6.15)

(51) Int.Cl.		F I		テーマコード (参考)
HO2N 11/00	(2006.01)	HO2N 11/00	Z	4J002
CO8L 27/06	(2006.01)	CO8L 27/06		
CO8K 5/11	(2006.01)	CO8K 5/11		

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 14 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2016-112501 (P2016-112501)</p> <p>(22) 出願日 平成28年6月6日 (2016.6.6)</p> <p>(31) 優先権主張番号 特願2015-240298 (P2015-240298)</p> <p>(32) 優先日 平成27年12月9日 (2015.12.9)</p> <p>(33) 優先権主張国 日本国 (JP)</p> <p>申請有り</p> <p>(出願人による申告) 平成27年度 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、次世代ロボット中核技術開発／革新的ロボット要素技術分野、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願</p>	<p>(71) 出願人 504180239 国立大学法人信州大学 長野県松本市旭三丁目1番1号</p> <p>(72) 発明者 橋本 稔 長野県上田市常田三丁目15番1号 国立大学法人信州大学繊維学部内</p> <p>(72) 発明者 李 毅 長野県上田市常田三丁目15番1号 国立大学法人信州大学繊維学部内</p> <p>(72) 発明者 鈴木 彩 長野県上田市常田三丁目15番1号 国立大学法人信州大学繊維学部内</p> <p>Fターム(参考) 4J002 BD041 EH096 FD026 GQ01</p>
---	---

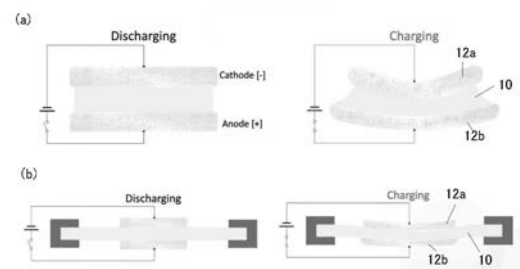
(54) 【発明の名称】 誘電アクチュエータ

(57) 【要約】

【課題】 数百V程度の電圧で駆動することができ、種々用途への利用が可能な誘電アクチュエータを提供する。

【解決手段】 シート状の誘電体10の両面に、厚さ方向に対向してそれぞれ柔軟性を有する電極12a、12bが設けられた誘電アクチュエータであって、前記誘電体10としてPVCゲルシートが用いられていることを特徴とする。前記PVCゲルシートは、ポリ塩化ビニル(PVC)と可塑剤としてアジピン酸ジブチル(DBA)を用いて形成され、PVCゲルシートを薄膜化すること、またはPVCゲルシートに予圧を加えることによって効果的な変位を可能にする。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

シート状の誘電体の両面に、厚さ方向に対向してそれぞれ柔軟性を有する電極が設けられた誘電アクチュエータであって、

前記誘電体としてPVC（ポリ塩化ビニル）ゲルシートが用いられていることを特徴とする誘電アクチュエータ。

【請求項 2】

前記誘電体は、前記電極に電圧を印加した際に、陰極側が凹となるように湾曲することを特徴とする請求項 1 記載の誘電アクチュエータ。

【請求項 3】

前記誘電体は、該誘電体の平面内において伸長させる予圧が加えられていることを特徴とする請求項 1 記載の誘電アクチュエータ。

【請求項 4】

前記電極間に作用させる印加電場が $20V / \mu m$ 以下で駆動されることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか一項記載の誘電アクチュエータ。

【請求項 5】

前記PVCゲルシートは、ポリ塩化ビニル（PVC）と可塑剤とからなることを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれか一項記載の誘電アクチュエータ。

【請求項 6】

前記可塑剤としてアジピン酸ジブチル（DBA）が用いられていることを特徴とする請求項 5 記載の誘電アクチュエータ。

【請求項 7】

前記ポリ塩化ビニル（PVC）とアジピン酸ジブチル（DBA）の組成比が $1 : 2 \sim 1 : 8$ であることを特徴とする請求項 6 記載の誘電アクチュエータ。

10

20

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は誘電アクチュエータに関し、より詳細には湾曲作用あるいは平面内において伸縮する作用を有する誘電アクチュエータに関する。

【背景技術】

【0002】

本発明者は、ポリ塩化ビニル（PVC）等の誘電材料を利用したゲルアクチュエータについて研究している（特許文献 1 等）。

図 20 に示すゲルアクチュエータは、メッシュ状の陽極 5 と平板状の陰極 6 とでゲルシート 7 を厚さ方向に挟む構造としたものである。電極間に電圧を印加すると陽極 5 のメッシュの網目内にゲルが引き込まれて厚さ方向に収縮し、電圧の印加を解除するとゲルシート 7 が元の状態に復帰して厚さ方向に変位する。これはゲルのクリープ現象を利用したものである。

図 21 に、ゲルに電圧を印加したときのクリープ作用を示す。ゲル 8 を電極 9 a、9 b で挟んで電圧を印加すると、ゲル 8 は陽極側に傾く（引き寄せられる）ようになる。これがクリープ作用である。図 20 に示すゲルアクチュエータは、メッシュ状の陽極を利用することにより、厚さ方向に変位する構成としたものである。

【0003】

ゲルシートのような柔らかい素材を利用したアクチュエータには誘電アクチュエータが

40

50

ある。誘電アクチュエータはシート状の誘電体の両面に電極を設け、電極間に電圧を印加するとマクスウェル応力により誘電体が厚さ方向に押し潰され、誘電体が面方向に延びる作用を利用する。誘電アクチュエータに用いられる誘電体には、誘電率が高いこと、低剛性であること、絶縁破壊強度が高いといったことが求められる。誘電アクチュエータには種々の誘電材料を用いるものが提案されている（特許文献2、3、4等）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2012-130201号公報

【特許文献2】特開2015-188032号公報

【特許文献3】特開2010-219380号公報

【特許文献4】特開2010-68667号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

従来の誘電アクチュエータは、2000V以上といった高電圧で駆動されるものであるため、誘電体の絶縁破壊強度の問題や、実用に際しての問題があった。

本発明は、数百V程度の電圧で駆動することができ、種々用途への利用が可能な、誘電アクチュエータを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明に係る誘電アクチュエータは、シート状の誘電体の両面に、厚さ方向に対向してそれぞれ柔軟性を有する電極が設けられた誘電アクチュエータであって、前記誘電体としてPVC（ポリ塩化ビニル）ゲルシートが用いられていることを特徴とする。

本発明に係る誘電アクチュエータにおいて誘電体として使用しているPVCゲルシートは、電極間に電圧を印加することにより、いわゆる誘電エラストマーと同様の作用をするものであるが、一般的な誘電アクチュエータに用いられている誘電エラストマーにはみられない作用（クリープ作用等）を備えることから、従来の誘電アクチュエータと比べてはるかに低電圧で駆動することができ、大きな伸縮率を備える誘電アクチュエータとして提供することができる。

【0007】

本発明に係る誘電アクチュエータは、前記誘電体が、前記電極に電圧を印加した際に、陰極側が凹となるように湾曲する特徴的な作用を備える。

また、前記誘電体は、誘電体の平面内において伸長させる予圧が加えられていることにより、効果的な伸縮作用を奏する。

また、本発明に係る誘電アクチュエータは、前記電極間に作用させる印加電場が20V/μm以下で駆動することができ、従来の誘電アクチュエータと比較してより小さな印加電場により駆動することが可能となる。

【0008】

また、PVCゲルシートは、ポリ塩化ビニル（PVC）と可塑剤とからなるものが好適に利用できる。前記可塑剤としてはジメチルアセトアミド（DMA）、セバシン酸ジエステル（DESuc）、ジエタノールアミン（DEA）、アジピン酸ジブチル（DBA）、セバシン酸ビス（DOS）、アジピン酸ジオクチル（DOA）、フタル酸ジメチル（DMP）、フタル酸ジブチル（DBP）、フタル酸ジオクチル（DOP）、フタル酸ビス（DEHP）、コハク酸ジエチル（DESuc）、アジピン酸ジメチル（DMA）、セバシン酸ジエチル（DESeb）、セバシン酸ジブチル（DBSeb）、セバシン酸ジオクチル（DOSeb）等がある。これら可塑剤のうちアジピン酸ジブチル（DBA）が好適に用いられ、前記ポリ塩化ビニル（PVC）とアジピン酸ジブチル（DBA）の組成比が1：2～1：8であるPVCゲルシートが好適に用いられる。

本発明では誘電体としてPVCゲルシートを使用しているが、PVCゲルシートと同様に、電圧を印加した際にクリープ作用を生じる誘電材料には、PVCゲルの他に、ポリメタクリル

10

20

30

40

50

酸メチル、ポリウレタン、ポリスチレン、ポリ酢酸ビニル、ナイロン6、ポリビニルアルコール、ポリカーボネイト、ポリエチレンテレフタレート、ポリアクリロニトリル、シリコーンゴム等をゲル化したゲル材料が用いられる。PVCゲルシートにかえてこれらの材料からなるゲルシートを使用することも可能である。

【発明の効果】

【0009】

本発明に係る誘電アクチュエータは、20V/ μm 以下の印加電場で駆動することができ、低電圧による駆動で大きな伸縮率を備える誘電アクチュエータとして提供することができる。

【図面の簡単な説明】

10

【0010】

【図1】誘電アクチュエータの組み立て斜視図(a)、側面図(b)である。

【図2】誘電アクチュエータの使用例を示す説明図である。

【図3】実験サンプルの作製方法を示す説明図である。

【図4】測定装置の構成を示す説明図(a)、実験サンプルの平面図(b)である。

【図5】厚さ500 μm のPVCゲルシートを誘電体としたときの測定結果を示すグラフである。

【図6】PVCゲルシートに作用する印加電場に対する伸縮率を示すグラフである。

【図7】厚さ200 μm のPVCゲルシートを誘電体としたときの測定結果を示すグラフである。

20

【図8】PVCゲルシートに作用する印加電場に対する伸縮率を示すグラフである。

【図9】厚さ200 μm と厚さ500 μm のPVCゲルシートについて、印加電圧と、印加電場に対する伸縮率を示すグラフである。

【図10】PVCゲルシートと誘電エラストマーを誘電体として使用した場合の伸縮率の測定結果を示すグラフである。

【図11】PVCゲルシートと誘電エラストマーを使用した場合について、印加電場に対する伸縮率を示すグラフである。

【図12】PVCゲルシートと誘電エラストマーについて、伸縮率の計算値と測定値とを示すグラフである。

【図13】実験サンプルの作成方法を示す説明図である。

30

【図14】サンプルの平面写真(a)と、電極に印加する電圧をON-OFFしたときの電極の写真(b)、(c)である。

【図15】PVCとDBAの組成比を1:4としたサンプルについて、予圧を加えない場合(a)と予圧を加えた場合(b)で、印加電場に対する伸縮率を示すグラフである。

【図16】図15(a)の実験結果を印加電場と伸縮率との関係として示したグラフである。

【図17】PVCゲルシートのゲル組成が異なるサンプルについて、印加電場に対する伸縮率を示すグラフである。

【図18】予圧を加えない場合のPVCゲルシートの絶縁強度を示すグラフ(a)と、予圧を加えない場合と予圧を加えた場合での絶縁強度の相違を示すグラフ(b)である。

40

【図19】PVCゲルシートを誘電体として使用した場合と、誘電エラストマーを誘電体として使用した場合について、印加電場に対する伸縮率を示すグラフである。

【図20】積層形のゲルアクチュエータの構成とその作用を示す説明図である。

【図21】ゲルのクリープ作用を示す説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

(誘電アクチュエータの構成)

図1(a)は本発明に係る誘電アクチュエータの組み立て斜視図、図1(b)は側面図である。本発明に係る誘電アクチュエータは、PVC(ポリ塩化ビニル)ゲルシートからなる誘電体10と、誘電体の厚さ方向の両面に対向させて配置した一対の電極12a、12bとか

50

ら構成される。電極 1 2 a、1 2 b はシート状の誘電体 1 0 を面的に被覆する電極であり、伸縮、曲げが容易に可能な柔軟電極である。

【 0 0 1 2 】

図 2 (a)、(b) は、誘電アクチュエータの使用例を示したもので、図 2 (a) は誘電体 1 0 と電極 1 2 a、1 2 b の外周縁を支持せずにフリー状態としたもの、図 2 (b) は誘電体の外周縁を支持した状態での使用例である。

【 0 0 1 3 】

図 2 (a) に示すように、誘電体 1 0 と電極 1 2 a、1 2 b の外周縁をフリー状態として電極（陰極）1 2 a、電極（陽極）1 2 b 間に電圧を印加すると、陰極 1 2 b と陽極 1 2 a がともに伸長するものの、陽極 1 2 b 側の伸長度が大きいことから、アクチュエータ全体としては陰極 1 2 a 側が凹む湾曲変形が生じる。陰極 1 2 a と陽極 1 2 b の伸長度に差が生じるのは、PVCゲルシートに電圧を印加すると、陽極側にゲルが引き込まれるクリープ変形によるものと考えられる。

陽極 1 2 b と陰極 1 2 a に印加する電圧を解除すると、誘電体 1 0 と電極 1 2 a、1 2 b はもとの平面形状に復帰する。

図 2 (a) に示す誘電アクチュエータは、電極に印加する電圧を ON-OFF 制御することにより、面形状が平面形状と湾曲形状との間で変化するアクチュエータとして利用することができる。

【 0 0 1 4 】

図 2 (b) では、電極 1 2 a、1 2 b に電圧を印加すると、電極（陰極）1 2 a、電極（陽極）1 2 b はともに伸長するが、陽極 1 2 b 側の伸長度が陰極 1 2 a 側よりも若干大きいため、陽極 1 2 b の側（図の下面側）が凸となるように若干湾曲しながら伸長する。

電極 1 2 a、1 2 b に印加する電圧を解除するともとの平面形状に復帰する。したがって、図 2 (b) に示す誘電アクチュエータの構成の場合は、平面内で伸縮するアクチュエータとして利用することができる。

【 0 0 1 5 】

（実験サンプルの作成例）

図 3 は実験で使用したサンプルの作製方法を示す。誘電体として用いる PVCゲルシート 2 0 を 2 枚のアクリルからなる支持板 2 1 a、2 1 b で厚さ方向に挟み（図 3 (a)）、PVCゲルシート 2 0 と支持板 2 1 a、2 1 b を重ね合わせた積層体の四隅を支持フレーム 2 2 により挟んで積層体を支持する（図 3 (b)）。支持板 2 1 a、2 1 b のそれぞれの中央部には円形の開口孔が設けられている。図 3 (c) は、支持板 2 1 a、2 1 b の開口孔内で PVCゲルシート 2 0 の表面に柔軟電極 2 4 を形成した状態を示す。柔軟電極 2 4 は PVCゲルシート 2 0 の上面と下面のそれぞれに、互いに対向する配置に設ける。

【 0 0 1 6 】

実験では、柔軟電極 2 4 として、シリコンオイルにカーボンを配合した導電性オイルコンパウンドを使用した。図 3 (d) は PVCゲルシート 2 0 に柔軟電極 2 4 を形成した状態の実験サンプルを平面方向から見た写真である。支持板（アクリル）2 1 a、2 1 b に設けた開口孔と、開口孔よりも小径に形成された柔軟電極 2 4 が形成されていることが分かる。中央の黒色に見える部分が柔軟電極である。

【 0 0 1 7 】

誘電体として使用する PVCゲルシート 2 0 は、あらかじめシート状に作製したものをを使用した。PVCゲルシートは、ポリ塩化ビニルと、可塑剤のアジピン酸ジブチル（DBA）とを、テトラヒドロフラン（THF）を溶媒に使用して混合液を調製し、この混合液をシャーレにキャストし、放置して溶媒を除去する方法により作製することができる。実験に使用した PVCゲルシートは PVC と DBA の重量比を 1 : 4 としたものである。実験では厚さ 200 μm と 500 μm のゲルシートを使用した。

【 0 0 1 8 】

（測定装置の構成）

図 4 (a) に測定装置の構成を示す。測定装置は実験サンプルの PVCゲルシート 2 0 の表裏

10

20

30

40

50

面に設けた電極 2 4 に電圧を印加したときにPVCゲルシート 2 0 がどのように変形するかを測定するものである。

測定装置は、実験サンプルをセットするセット台 3 0 と、実験サンプルに電圧を印加する電源 3 2 と、セット台 3 0 にセットした実験サンプルの上方に設置したカメラ 3 4 とを備える。カメラ 3 4 は、柔軟電極 2 4 に電圧を印加したときの柔軟電極 2 4 のサイズ（径寸法）の変化を検出するためのものである。

【 0 0 1 9 】

図 4 (b) は実験サンプルの平面図である。PVCゲルシート 2 0 は寸法5cm x 5cmの矩形形、支持板 2 1 a、2 1 b も5cm x 5cmの矩形形、支持板 2 1 a、2 1 b に設けた開口孔の孔径は3cm、PVCゲルシート 2 0 に設けた柔軟電極は径1cmの円形状とした。

10

PVCゲルシートに印加した電圧は500 ~ 4000V、実験で使用したサンプル数は3である。

なお、測定は、PVCゲルシート 2 0 に予圧を加えない場合と、予圧を加えた場合について行った。誘電アクチュエータを使用する際には、誘電体（誘電エラストマー）に引っ張り力を作用させた状態で使用する場合が一般的である。誘電体に引っ張り力を作用させることを予圧を加えるという。誘電体に引っ張り力を作用させると、誘電体の厚さが薄くなり、一般には誘電体の伸縮作用が増大する。

【 0 0 2 0 】

（実験 1 : PVCゲルシートを用いる誘電アクチュエータ）

図 5 は、厚さ500 μm のPVCゲルシートを誘電体としたときの測定結果を示す。測定はPVCゲルに予圧を加えない場合と、240%変形の予圧を加えた場合について行った。240%変形の予圧とは、PVCゲルシートに予圧を加えないとき（予圧前）の面積と予圧後の面積との差分と、予圧前の面積との比率が240%となるようにPVCゲルシートに引っ張り力を作用させたという意味である。

20

図 5 (a) が変位量（電極の平面内における変位量）、図 5 (b) が伸縮率である。伸縮率は、電圧を印加する前後における電極の面積の差と、電圧を印加しない状態における電極の面積との比率である。

図 5 (a) は、印加電圧が増大するとともに、変位量も伸縮率も徐々に増加したことを示す。予圧を作用させた場合の方が、予圧を作用させない場合よりも大きな伸縮率を示している。予圧を作用させたものでは、印加電圧が3000Vで伸縮率が12%となった。

【 0 0 2 1 】

図 6 は、PVCゲルシートに作用する印加電場 ($\text{V}/\mu\text{m}$) に対する伸縮率を示したものである。

30

図 6 から、PVCゲルシートに予圧を作用させた場合には、予圧を作用させない場合と比較して伸縮率は低くなる傾向があることがわかる。

【 0 0 2 2 】

図 7 は、厚さ200 μm のPVCゲルシートを誘電体として使用し、PVCゲルに予圧を加えない場合と、190%の変形の予圧を加えた場合について測定した結果を示す。図 7 (a) は変位量、図 7 (b) は伸縮率である。

図 7 においても、印加電圧が増大するとともに、変位量も伸縮率も徐々に増加すること、予圧を作用させた場合の方が、予圧を作用させない場合よりも大きな伸縮率を示している。

40

【 0 0 2 3 】

図 8 は、PVCゲルシートに作用する印加電場 ($\text{V}/\mu\text{m}$) に対する伸縮率を示したものである。

図 8 に示した測定結果も、PVCゲルシートに予圧を作用させた場合には、予圧を作用させない場合と比較して伸縮率が低くなることを示している。

【 0 0 2 4 】

図 9 は、厚さ200 μm と厚さ500 μm のPVCゲルシートについて、印加電圧と、作用させた電界（印加電場）に対する伸縮率を対比して示したものである。

印加電圧について見ると、印加電圧が同一である場合、予圧を加えない場合も予圧を加

50

えた場合も、ともに厚さが薄い(200 μm) PVCゲルシートを使用したものの方が、厚さが厚い(500 μm) PVCゲルシートを使用したものよりも伸縮率が大きくなる。

印加電場について見ると、予圧を加えない場合も予圧を加えた場合も、ともに印加電場にほぼ比例する伸縮率が得られている。

【0025】

<PVCゲルシートと誘電エラストマーとの比較実験>

誘電体としてPVCゲルシートを使用した場合と、従来用いられている誘電エラストマーを使用した場合について、電圧を印加した際の伸縮率等について比較する実験を行った。

なお、誘電エラストマーを使用する場合も、PVCゲルシートを使用する場合と同様に、
図3に示したと同様の実験サンプルを作製して実験を行った。

表1に、実験に使用したPVCゲルと誘電エラストマーについての特性とサンプルの条件を示す。誘電エラストマーにはアクリル発泡テープ(3M社製 VHB4905)を使用した。表1で190%(200 μm 68 μm)等とあるのは、予圧を加えることによってシート厚さが薄くなることを示す。

【表1】

	PVC gel	Elastomer
Dielectric constant (ϵ_r)	10	4.7
Young modulus (E)	330kPa	420kPa
Poisson's ratio (ν)	0.4	0.3
Thickness (d)	200 μm , 500 μm	500 μm
size	5cm \times 5cm	5cm \times 5cm
Electrodes size	Φ 1 cm	Φ 1 cm
Pre-strain (thickness)	0%, 190% (200 μm \rightarrow 68 μm) 0%, 240% (500 μm \rightarrow 134 μm)	0%, 610% (500 μm \rightarrow 70 μm)
Applied voltage (V)	500~4000V	500~2500V
Sample number	3 of each thickness	3

【0026】

図10は、PVCゲルシートと誘電エラストマーについて伸縮率を測定した測定結果を示す。図10(a)が予圧を加えない場合、図10(b)が予圧を加えた場合である。これらの測定結果は、PVCゲルシートを用いた誘電アクチュエータの方が誘電エラストマーを用いた誘電アクチュエータとくらべて伸縮率が大きくなることを示す。

【0027】

図11は、PVCゲルシートと誘電エラストマーを使用した場合について、印加電場に対する伸縮率を示したものである。図11は、PVCゲルシートを使用する方が誘電エラストマーを使用する場合と比較して、同一の電界作用における伸縮率が大きくなることを示す。また、PVCゲルシートを使用する場合は、1V/ μm 以下の電界の作用によって駆動されることがわかる。

【0028】

(理論値との比較)

誘電アクチュエータにおいて、電極間に電圧を印加したときに電極間にマックスウェル応力が作用して平面内で伸縮する作用が生じるとされている。電極間に作用するマックスウェル応力P、マックスウェル応力によって生じる変位、伸縮率 s 等は次式によって与えられる。

【数 1】

$$\begin{aligned} \text{Stress: } P &= \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{V}{t}\right)^2 \\ \text{Strain: } y &= \frac{P}{Y} = \frac{1}{Y} \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{V}{t}\right)^2 \\ x &= \nu y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Area: } d' &= d + dx \\ s &= \pi d^2 \\ s' &= \pi d'^2 \\ \text{Expansion ratio: } \Delta s &= \frac{s' - s}{s} \times 100\% = \frac{d'^2 - d^2}{d^2} \times 100\% \end{aligned}$$

ここで、P:マクスウェル応力、 ε_0 :真空の誘電率、 ε_r :誘電率、E:電場、V:印加電圧、Y:ヤング率、t:誘電体の厚さ、x:水平方向の変位量、y:垂直方向の変位量、 ν :ポアソン比、d、d':変形前後の径、S、s':変形前後の面積である。

10

【0029】

図12は、PVCゲルシートを用いた場合(図12(a))と誘電エラストマーを用いた場合(図12(b))について、上式から求められる伸縮率の計算値と測定値とを比較したグラフである。

図12(a)と図12(b)を見ると、誘電エラストマーについては測定値と計算値とが略一致するのに対して、PVCゲルシートの場合には、伸縮率の計算値と測定値が大きく異なっている。この結果は、誘電エラストマーを使用した誘電アクチュエータでは、一般的なマクスウェル応力の作用に基づいてエラストマーが変形(伸縮)すると考えられるが、PVCゲルシートを用いる誘電アクチュエータでは、マクスウェル応力による作用以外の作用、たとえばクリープ変形による作用が変形(伸縮)作用に寄与している可能性を示唆する。

20

【0030】

(実験2:PVCゲルシートを用いる誘電アクチュエータ)

PVCゲルシートとして、ポリ塩化ビニル(PVC)とアジピン酸ジブチル(DBA)の組成比が異なる誘電アクチュエータのサンプルを作製し、電圧を印加した際の伸縮率等について測定した。

表2に実験に使用したサンプルと実験条件を示す。

【表2】

PVC:DBA	ゲル厚(μm)	予ひずみ(%)	印加電圧(V)
1:2	32, 67, 110	0, 180	0~3600
1:4	46, 104, 200	0, 180	0~3200
1:8	72, 168, 365	0, 180	0~2200

30

実験に使用したサンプルのPVCとDBAの比率は、1:2、1:4、1:8の3種である。それぞれの比率のPVCゲルシートについて、ゲルの厚さを変えた3種類のサンプルを用意した。DBAの比率を高くすると、PVCゲルシートはより柔らかくなる。また、DBAの比率を高くすると溶媒のTHFの比率が低くなり、溶媒の揮発量が減り、同量の溶液から成膜した場合に残る溶液の量が多くなり膜厚が厚くなる。

PVCゲルシートはより柔らかくなる。なお、サンプルは前述したと同様に、ポリ塩化ビニルと、可塑剤のアジピン酸ジブチル(DBA)を、テトラヒドロフラン(THF)を溶媒として混合し、混合液をシャーレにキャストし溶媒を除去する方法によって作製した。

40

【0031】

図13にPVCゲルシートを用いた実験サンプルの作成例を示す。

本実験では平面形状が矩形(9cm×9cm)の剛体フレーム42にPVCゲルシート40を支持して測定用のサンプルを作製した(図13(a))。

図13(b)、(c)、(d)はPVCゲルシートに予圧を加えたサンプルを調製する方法を示す。PVCゲルシートに予圧を加える場合は、PVCゲルシートの表面に予圧量に応じて、予め所定の大きさの四角形の領域を示す線を記しておき、PVCゲルシート上の四角形の辺の位置が剛体フレーム40の辺の位置に一致するようにPVCゲルシートの外縁を外側へ引っ張って

50

広げる方法で行った。

図 1 3 (b)は、PVCゲルシート 4 0 の外周縁を外側の剛体フレーム 4 2 に向けて引っ張っている状態、図 1 3 (c)はPVCゲルシート 4 0 に記した四角形の辺の位置を剛体フレーム 4 2 の辺の位置に一致させて固定支持した状態を示す。

【 0 0 3 2 】

この実験では予圧（予ひずみ）を180%とした。これは、PVCゲルシートを平面内で広げる前と広げた後の面積の差分が、広げる前の面積に対して180%となるようにPVCゲルシートに引っ張り力を作用させたという意味である。したがって、PVCゲルシートに対する引っ張り量を調節することにより、PVCゲルシートに任意の予圧（予ひずみ）を作用させることができる。

10

予圧（予ひずみ）を作用させない（0%）場合は、剛体フレーム 4 2 の大きさに合わせて矩形に作成したPVCゲルシートを、引っ張り力を作用させずに剛体フレーム 4 2 に取り付けた。

【 0 0 3 3 】

電極には、シリコンオイルにカーボンを配合した導電性オイルコンパウンドを使用し、導電性オイルコンパウンドを塗布する方法により電極を形成した。本実験では、平面形状が正方形の剛体フレーム 4 2 の平面形状に合わせて、PVCゲルシート 4 0 の上面と下面の中央に、それぞれ陽極と陰極となる平面形状が正方形の電極 4 4 を設けた。また、PVCゲルシート 4 0 の上面と下面に、導電性オイルコンパウンドを用いて、陽極と陰極に接続する引き出し線 4 5 a、4 5 b を設けた。

20

剛体フレームの平面サイズは9cm×9cm、電極の平面サイズは2cm×2cmである。

導電性オイルコンパウンドを用いて形成した電極及び引き出し線は、導電膜として十分な伸縮性を備えており、電極に電圧を印加することでPVCゲルシートが拡張する作用を抑制するものではない。

【 0 0 3 4 】

図 1 4 (a)は作成したサンプルの平面写真である。PVCゲルシートは透明であり、上面側からPVCゲルシートに設けた下面の引き出し線が見えている。

図 1 4 (b)、(c)は、電極に印加する電圧をON-OFFしたときの電極の写真である。図 1 4 (b)は電圧を印加していない状態、図 1 4 (c)が電圧を印加した状態である。電圧を印加すると電極が平面内で広がる様子がわかる。

30

本実験においても、電極に電圧を印加したときの誘電アクチュエータの伸縮率は、図 4 に示した方法と同様に、デジタルカメラで電極の平面サイズを検知する方法で行った。

【 0 0 3 5 】

< 印加電圧と伸縮率との関係 >

図 1 5 は、PVCとDBAの組成比を1：4としたサンプルについて印加電圧と伸縮率との関係を測定した結果を示す。伸縮率は、（電圧を印加した状態の電極面積と電圧を印加しない状態の電極面積の差）と（電圧を印加しない状態での電極面積）の比率である。

図 1 5 (a)はPVCゲルシートに予圧を加えない場合、図 1 5 (b)はPVCゲルシートに予圧（180%）を加えた場合である。それぞれゲルシートの厚さが46 μm、104 μm、200 μmのサンプルについての測定結果を示す。

40

なお、厚さが46 μmのサンプルについては、電氣的に短絡することを回避するため印加電圧を500V以下程度に設定した。ただし、予圧を加えたサンプルについては、予圧を加えないものと比較して電氣的に短絡する電圧が高くなる。

【 0 0 3 6 】

図 1 5 (a)、(b)は、印加電圧を増大させるとともに、誘電アクチュエータの伸縮率が增大すること、膜厚が薄いサンプルの方が厚いサンプルよりも伸縮率が大きくなること、予圧を加える方が予圧を加えない場合よりも伸縮率が大きくなることを示す。

図 1 5 に示す実験結果は、PVCとDBAの組成比を1：4としたサンプルについての実験である図 5 の実験結果と比較して、伸縮率が大きくなっている。図 5 に示した実験ではPVCゲルシートの厚さを500 μmとしていたのに対し、この実験ではPVCゲルシートの厚さをより

50

薄くしたサンプルを用いていることによる。

【0037】

図15に示すように、PVCゲルシートの厚さが薄い方が伸縮率が大きく表れる理由は電極間に作用するマックスウェル応力 P が誘電体の厚さ t の逆数で作用することによる。

図16は、図15(a)の実験結果を印加電場と伸縮率との関係として示したグラフである。図16に示すように、印加電場($V/\mu m$)を基準として、印加電圧を変えたときの各サンプルの伸縮率を図示すると、伸縮率についての測定値は、印加電場が増大するとともに単調に増加する。すなわち、PVCゲルシートの厚さが厚いサンプルも薄いサンプルも、サンプルに作用する印加電場について見れば、同一の伸縮率になることが分かる。すなわち、厚さが薄いPVCゲルシートからなるサンプルでは、同一の印加電圧であっても、印加電場が相対的に大きく作用し伸縮率が大きくなる。したがって、同一の伸縮率を得る場合に、PVCゲルシートの厚さを薄くすることによって低電圧化を図ることができる。

10

【0038】

<ゲル組成と伸縮率との関係>

図17はPVCゲルシートのゲル組成が異なるサンプルについての伸縮率を、印加電場($V/\mu m$)について示したものである。

測定に用いたサンプルは、PVCとDBAの組成比を1:2、1:4、1:8としたサンプルで、それぞれ厚さの異なるサンプルについて、印加電圧を変えて測定した。なお、測定はPVCゲルシートに予圧を加えて測定した。

図17に示す測定結果は、PVCとDBAの組成比で、DBAの組成比が大きいものほど、印加電場に対する伸縮率が大きくなり、3種の組成比のうちでは、PVCとDBAの組成比が1:8のものが最も伸縮率が大きくなることを示す。可塑剤であるDBAの組成比が大きいものほど伸縮率が大きくなる理由は、可塑剤の組成比を大きくすることでゲルシートが軟らかくなり、ヤング率が小さくなるからである。したがって、可塑剤(DBA)の組成比を調節することによって誘電アクチュエータの低電圧化が可能である。図17から、PVC:DBA=1:8のPVCゲルシートを使用する場合、印加電場 $15V/\mu m$ で伸縮率76%となる。

20

【0039】

<PVCゲルシートの絶縁強度>

図18(a)、(b)は、PVCとDBAの組成比が異なる場合にPVCゲルシートの絶縁強度がどのように変化するかを測定した結果を示す。

図18(a)は、PVCゲルシートに予圧を加えない場合の測定結果である。PVCに対するDBAの比率を横軸として示している。図18(a)に示すように、可塑剤DBAが増加するとともに絶縁強度が低下することを示す。なお、絶縁強度は同一の組成であれば、PVCゲルシートの厚さに関わらずほぼ一定である。PVC:DBA=1:8のサンプルでは、絶縁強度は約 $7V/\mu m$ である。

30

【0040】

図18(b)は、PVCゲルシートに予圧を加えない場合と予圧を加えた場合(180%)とで、絶縁強度がどのように変化するかを示したものである。図18(b)から、PVCとDBAの組成比が異なるいずれの場合も、PVCゲルシートに予圧を作用させることによって絶縁強度が向上することがわかる。これら3種の組成が異なるPVCゲルシートでは、PVCとDBAの組成比が1:2のものが最も絶縁強度の向上が顕著である。PVC:DBA=1:8のサンプルでは、予圧を加えない場合と比較して絶縁強度は約 $12V/\mu m$ に向上した。絶縁強度の改善には、予圧の大きさにも依存する。予圧の大きさを180%よりも大きくすることによって絶縁強度をさらに改善することが可能である。

40

【0041】

<PVCゲルシートと誘電エラストマーとの比較実験>

図19は、上述したPVCゲルシートを誘電体として使用した場合と、従来用いられている誘電エラストマーを誘電体として使用した場合について、電圧を印加したときの伸縮率について測定した結果を比較して示す。

図19では、PVCとDBAの組成比を1:4、としたサンプルと1:8としたサンプルについて

50

、PVCゲルシートに予圧（180％）を加えた場合の測定結果を示す。誘電エラストマーにはアクリル発泡テープ（3M社製 VHB4905）を使用した。誘電エラストマーについての伸縮率の測定は、PVCゲルシートを使用した場合と同様に、誘電エラストマーのフィルムを引き伸ばして剛体フレームで誘電エラストマーの周囲を支持することで誘電エラストマーのフィルムに予圧（予ひずみ）を付与し、誘電エラストマーの上面と下面にシリコングリス電極を設けて、電極面積の変化を検知する方法で行った。誘電エラストマーは予圧を加えて使用する。実験では、誘電エラストマーの膜厚が500 μmから55 μmとなるように予圧（800％）を加えて測定した。

【 0 0 4 2 】

図 1 9 は電極に印加した印加電場（V/ μm）に対する伸縮率である。表 3 に誘電体としてPVCゲルシートを使用した場合と、誘電エラストマーを使用した場合についての駆動電場、伸縮率、応答時間を示す。

【表 3】

	駆動電場(V/μm)	伸縮率 (%)	応答時間 (s)	
			15V/μm時	2kV時
PVC:DB A-1:4	1.3 ~	12	~ 0.1	
PVC:DB A-1:8	0.4 ~	76	~ 0.1	
VHB-4905	10 ~	1	~ 2	

【 0 0 4 3 】

表 3 に示す駆動電場は、誘電アクチュエータとして駆動するに必要な最低の印加電場の意味で用いている。ここでは、伸縮率が0.5％以上となる際の印加電場を駆動電場とした。表 3 からわかるように、誘電体としてPVCゲルシートを使用した場合は、誘電エラストマーを使用した場合と比較して駆動電場が 1 / 10程度となり、低電圧での駆動が可能となる。

表 3 において、伸縮率は印加電場が15V/ μmにおける伸縮率を示す。伸縮率についても、PVCゲルシートを使用することにより誘電エラストマーと比べてはるかに大きな伸縮率が得られることが分かる。

表 3 に示す応答時間は、誘電体の変形開始（厚さ方向に収縮開始する）してから、変形量が最大になるまでの時間である。この応答時間についてもPVCゲルシートの場合は誘電エラストマーの1/10程度以上に短縮することができている。

【符号の説明】

【 0 0 4 4 】

- 5 陽極
- 6 陰極
- 7 ゲルシート
- 1 0 誘電体
- 1 2 a、1 2 b 電極
- 2 0 PVCゲルシート
- 2 1 a、2 1 b 支持板
- 2 2 支持フレーム
- 2 4 柔軟電極
- 3 2 電源
- 3 4 カメラ
- 4 0 PVCゲルシート
- 4 2 剛体フレーム
- 4 4 電極
- 4 5 a、4 5 b 引き出し線

10

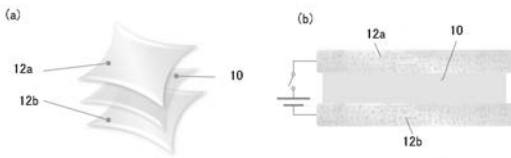
20

30

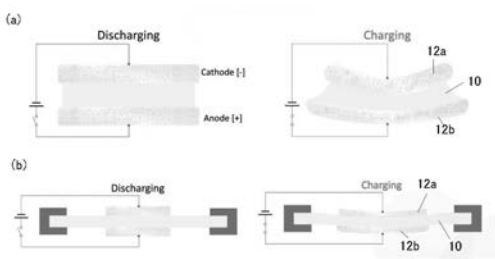
40

50

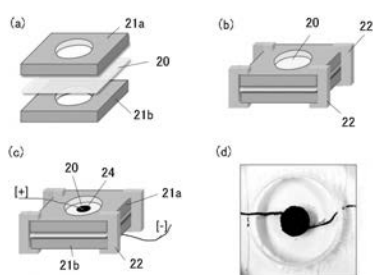
【 図 1 】



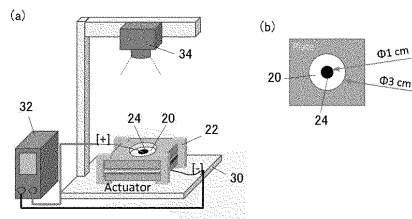
【 図 2 】



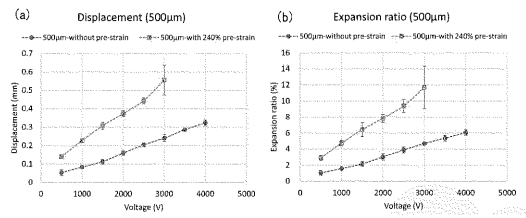
【 図 3 】



【 図 4 】

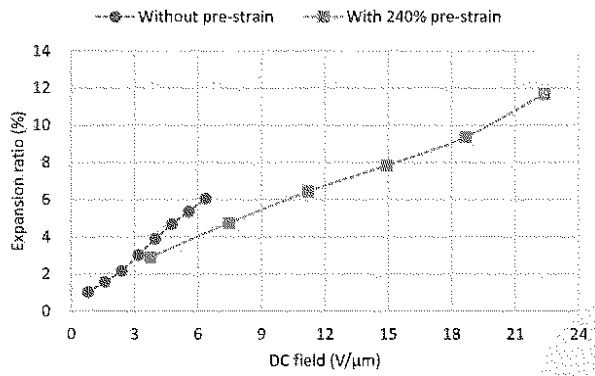


【 図 5 】



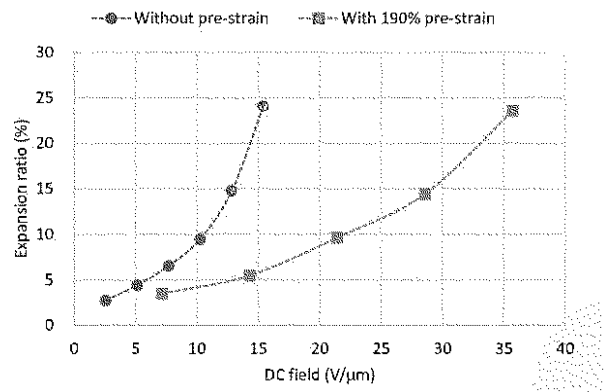
【 図 6 】

Expansion ratio with different DC fields (500 μ m)

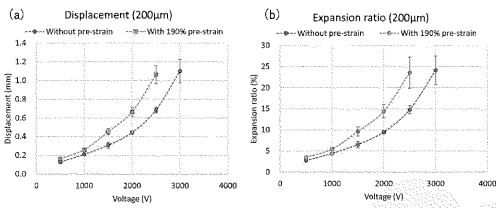


【 図 8 】

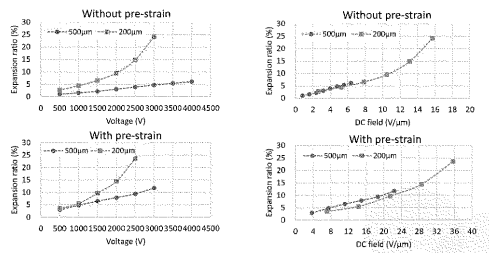
Expansion ratio with different DC fields (200 μ m)



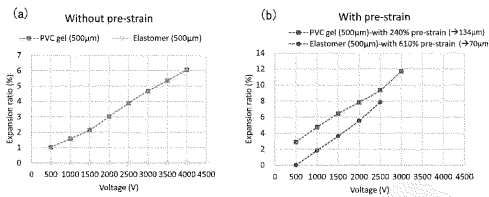
【 図 7 】



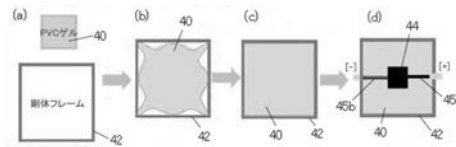
【 図 9 】



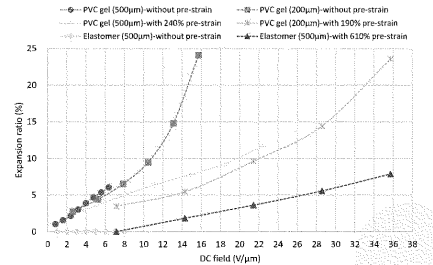
【 図 10 】



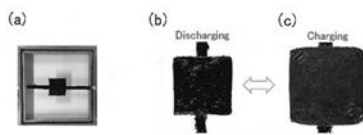
【 図 13 】



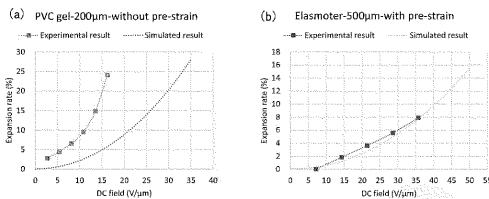
【 図 11 】



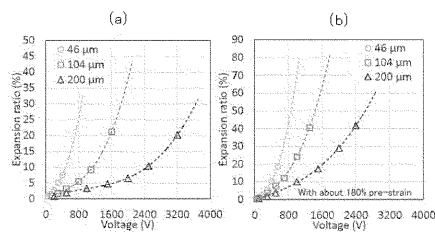
【 図 14 】



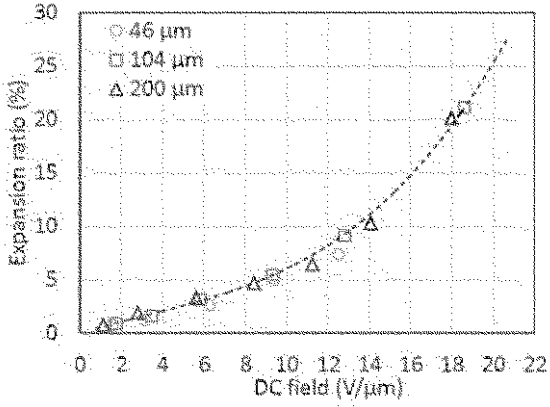
【 図 12 】



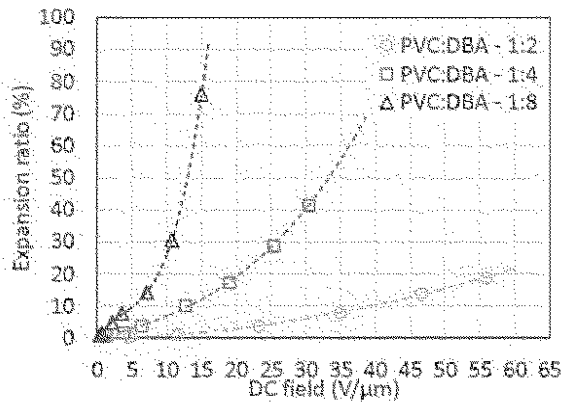
【 図 15 】



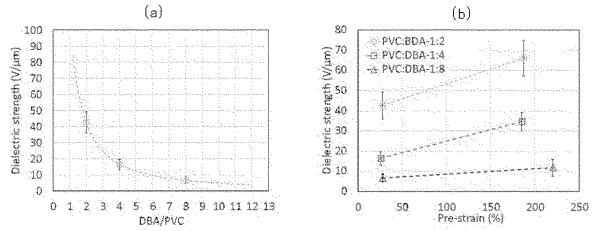
【 図 1 6 】



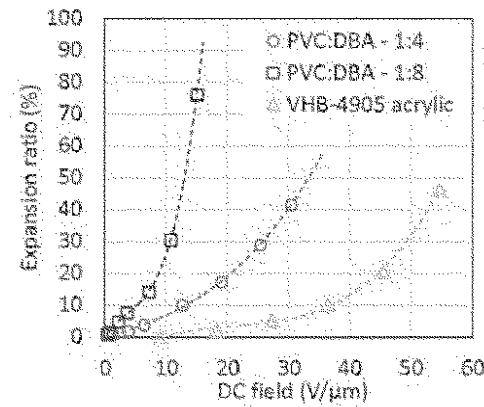
【 図 1 7 】



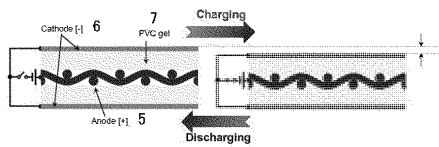
【 図 1 8 】



【 図 1 9 】



【 図 2 0 】



【 図 2 1 】

