

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25288059

研究課題名(和文) 圧電性らせん高分子における擬似レイリー波の創生とその機能化

研究課題名(英文) Development of Environmentally Friendly Piezoelectric Polymer Film Actuator Having Multilayer Structure

研究代表者

田實 佳郎 (Tajitsu, Yoshiro)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：00282236

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：L型ポリ乳酸(PLLA)はその透明性、非焦電性、柔軟性、圧電経時安定性などから、アクチュエータとして非常にユニークな能力を示す。それは従来有機高分子膜では不可能であるとされたレイリー波を発生させることにある。レイリー波は無機圧電材料PZTなどでは精密アクチュエータや無音モータの道を開いたが、その発生原理からPZTの場合サイズに制限がある。これに対して本研究ではその疑似的なレイリー波を発生させる方法を基礎的に確立しPLLAアクチュエータの安定的な動作、製造法を確立し、待望される小型搬送システムなどへの実用化への道を開いた。

研究成果の概要(英文)：We designed a piezoelectric polymer film actuator using poly(L-lactide) (PLLA) and poly(D-lactide) (PDLA) films. On the basis of their piezoelectric characteristics, we were able to realize a PDLA and PLLA multilayer film (PDLA/PLLA multilayer) with a simple structure. The PDLA/PLLA multilayer film of centimeter-order size shows a large piezoelectric resonance, and its piezoelectric performance is equivalent to that of a practical piezoelectric ceramic. First, we introduce the piezoelectric characteristics of a PLLA film and the concept of actuation system using PLLA film. Next, the fabrication process of PDLA/PLLA multilayer film and its piezoelectric characteristics were summarized. Finally, the typical examples of developed piezoelectric polymer actuation system using PDLA/PLLA multilayer film were described specifically in order to clarify the possibility of new application of piezoelectric polymer actuation system.

研究分野：工学

キーワード：圧電性 高分子 フィルム

### 1. 研究開始当初の背景

圧電性の一つに、物質に歪や応力を与えると分極が生じる現象(圧電正効果)がある。この圧電正効果は力や変位を検出する感知センサとして自動化を支える。一方、最近では、スマートフォン、タブレット PC、ポータブルゲーム機の普及に伴い、表示素子に接触し操作するタッチパネルを超えた新しいヒューマンマシンインターフェースの要望が高まっている。これを実現する材料として、圧電セラミックスの応用が長い間期待され、研究されてきた。しかしながら、圧電セラミックスは焦電性(温度変化に伴い分極量変化)を示すため、接触型インターフェースに使用した場合、表示素子に人間が単に触れ温度が上昇してしまった効果と、力を加え機械を操作した効果(圧電正効果)を分離できないという実用化を阻む深刻な問題があった。

我々は、キラル分子を持ち主鎖がらせん構造を示す高分子(らせん高分子)の圧電性研究を長年重ねてきた。その中で、らせん高分子の一種である L 型ポリ乳酸(PLLA)のずり圧電性を利用した透明高分子圧電フィルムを具現化した。このフィルムには焦電性がないことが特徴である。圧電性らせん高分子は、今回の発表までは実用化されたものは無く、その研究は脚光を浴びることはなかった。しかし、ソフトで透明な高分子圧電体の正効果を利用した苛烈な開発競争が、今後全世界的に行われるのは明らかである。

### 2. 研究の目的

我々が一步先に進むために、高分子圧電体では従来不可能とされてきた実用的な圧電逆効果(電界を圧電材料に印加すると、歪や応力が発生する現象)の顕著な発現を目指し、アクチュエータへの利用を図る。現在、セラミックスの圧電逆効果は、マイクロマシンや精密加工用ステージなどの駆動部品、ロボットなどの複雑な動きを実現するアクチュエータとして利用され、機械・電子・航空宇宙産業などの先端産業に無くてはならないものとなっている。現在、実用的な圧電逆効果を示す素材は、チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)セラミックスである。しかし、近年環境に対する負荷軽減の観点から、鉛を使わない lead-free な圧電性物質の開発が求められている。特に EU 諸国では、RoHS 指令によりその必要性が高まっている。また一方で、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)分野における研究の進展に伴って、微小な空間において回転動作や並進動作を得るための軽量のアクチュエータの開発も求められている。このような状況の中でも、近年まで圧電性高分子の圧電率は PZT セラミックスの 1/100 以下、更に鋭い共振現象が起きないため、アクチュエータ動作に必要な実用的な応力が発生せず、lead-free な圧電性物質の重要な候補になりえなかった。しかし我々が圧電率を向上させた PLLA フィルムはそれを

覆す性能を示唆している。これを発展させる。

### 3. 研究の方法

我々が提案する擬似レイリー波発生法を簡単にまとめる。①らせん高分子圧電フィルムに外部交流電界が印加すると、ずり変形が逆圧電性により生じる。②これを受け弾性応力が発生する。③この発生応力が十分大きく、フィルムのサイズで決定される共振波長に一致する弾性波をフィルム全体で引き起こす時、弾性縦波共振が発生する。④このとき、フィルム端面に垂直に大きく一方向に伸縮変位が起きる。⑤この大きな伸縮変位を起こしている端面で、圧電性によるずり変位を垂直方向に重ねる。

ここで重要なことは「圧電ずり変位の方向が共振による伸縮変位の方向に対してできるだけ垂直でなくてはならない」。何故なら、共振時による伸縮変位量は圧電ずり変位量の 100 倍以上大きい。従って、共振変位とずり変位の方向が垂直でないと、伸縮変位のずり変位方向の位相がずれた成分が発生し、僅かにしか変位しないずり変位を直ぐに打ち消してしまう。その場合、共振による伸縮変位しか残らず、端面に楕円を描くレイリー波が発生せず、駆動力になりえない。

このことから、らせん高分子フィルムに必要な物性(開発指針)は次の二点に絞られる。

(1) 共振変位の方向とずり変位の方向を垂直にする(理論では、共振変位は分子鎖配向方向に垂直に起こり、ずり変位は分子鎖配向方向に平行に起こる)。→フィルムの一軸配向分布をできるだけ均一。

(2) 一軸配向性が 100%になることは現実的にはありえず、その場合、共振変位におけるずり変位方向の成分に打ち消されないおおきなずり変位が必要である。→らせん高分子フィルムの高圧電性の実現。

更にこの擬似レイリー波を駆動力とするアクチュエータを、産業システムに活用するためには、波長一定のレイリー波を長時間に亘り安定に生起する方法(制御システム)を確立する必要がある。

### 4. 研究成果

(1) PLLA 円筒型トランスデューサの共振変位

圧電 PLLA フィルムを図 1 のようにロール状にし、レイリー波発生に関する基礎的検討を行い、解析した。その

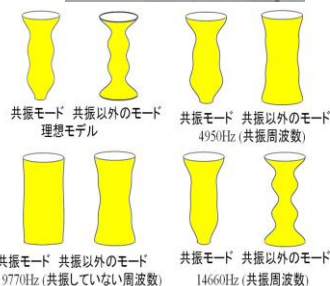
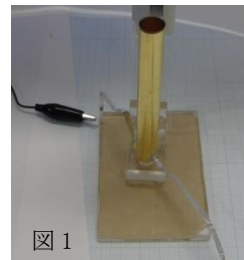


図 2

結果、共振現象時と非共振時に起きる変位について図2に示すような明確な相違を見出した。

(2) PLLA 円筒型トランスデューサを用いた擬似レイリー波の特徴

PLLA 円筒型トランスデューサに発生している擬似レイリー波の基礎特性を追求した。

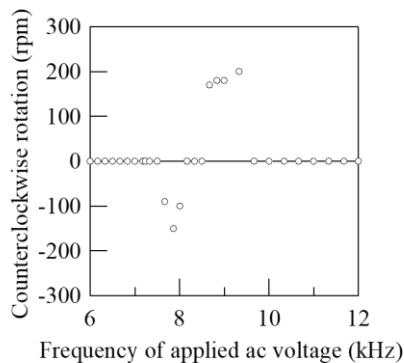


図3

その結果、図3に示すように大変驚くべきことが判明した。図3は PLLA 円筒型トランスデューサの上に置いたプラスチックボールの回転数と回転方向を加えた交流電界の周波数に対してまとめたものである。共振周波数でプラスチックボールがスムーズに回転すると同時にその共振数周波数によって、回転方向が変わることを示す。これは PLLA フィルムが粘性項を持つために、それが共振状態(図2)で位相遅れを発生するためと考えられる。言い換えれば、これは高分子が無機材料に比べ弾性ロスが大きいことが原因で PLLA 円筒型トランスデューサに顕著に表れている結果である。

(3) ギヤ不要の回転モータの可能性実証

上記で見出した PLLA 円筒型トランスデューサへの印加電界の周波数により擬似レイリー波の進行方向が左回りから右回りに変更する性質が工業的に応用が可能であるかを追求した。図4に示すネジと連動させた治具を作成し、印加周波数を変えることでこの

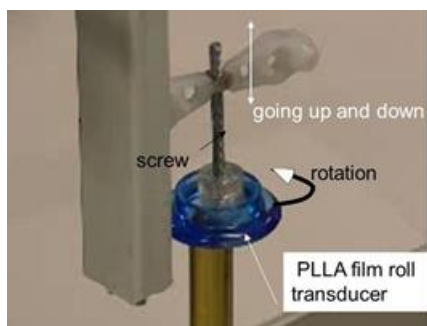


図4

ネジに対する回転の向きを変え、プロペラを上下させることに成功した。これは複雑なギアやトランスミッションを用いることなく、回転方向を正確に制御できることを実証し、新たな軽量、複雑な機械機構のない回転モータを実現できる可能性を示した。本研究の成果の中でも特筆すべき

成果である。

(5) 積層型トランスデューサ

円筒型 PLLA トランスデューサは基礎研究には向いているが、駆動力は僅かであり、実用化の道は開かない。そこで、圧電セラミックスでは確立されている積層化による駆動力の向上を試みた。本研究での特徴は PLLA がキラル高分子であることを積極的に利用した。異性体である D 体である PDLA の圧電性は図5(a)示すように PLLA と圧電変位が逆になる。そのため PLLA/PDLA の積層体をそれを重ねるだけで良く、図5(b)に示すような素子を工業的に作成することは容易である。

実際、積層型トランスデューサでは、図6に示すような単一圧電フィルムでは見られない圧電共振曲線を発現し、駆動力の向上を期待できることを証明した。図7に示すように積層体の見かけの各定数を示す。各定数とも積層数に従い、増加していることが分かる。とくに見かけの圧電定数  $d$  に注目するとその値  $400\text{pC/N}$  に達しておりこれは実用圧電セラミックスの

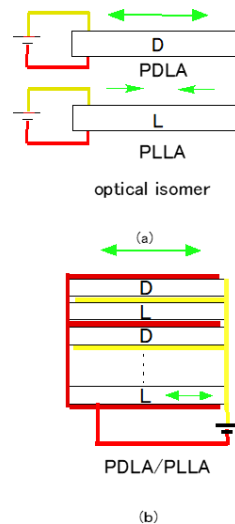


図5

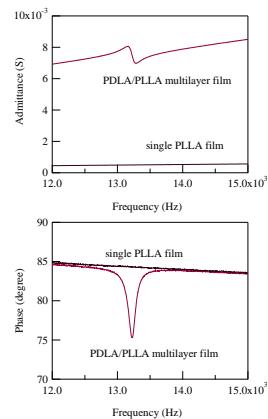


図6

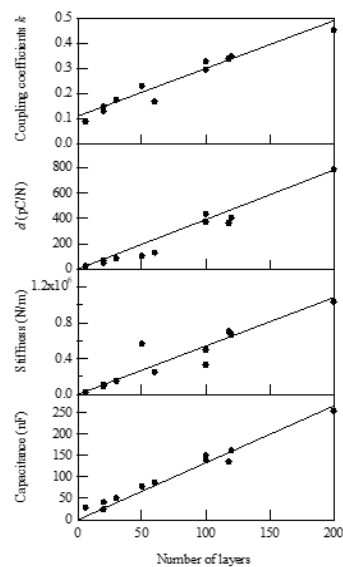


図7

それに匹敵する。

(6)積層型トランスデューサの発生力の実証  
積層型積層型トランスデューサを用いてそのパワーを実証するためのデモンストレーション実験を行ってきた。

(a)回転駆動

図8に示す実験は駆動力のない回転系の上に2kgを超えるPCを置き(回転対象物に完全な対称でない重心が中心からずれている状態),現実の応用に近い状態で,積層型トランスデューサがパワーを発揮できるように最適化した。研究開始当初は数分しか回転を持続できなかったが,積層型トランスデューサの張り合わせと入力インピーダンスが大きいのでそのマッチングを改善することで,数時間の連続を運転が安定的に可能になっ

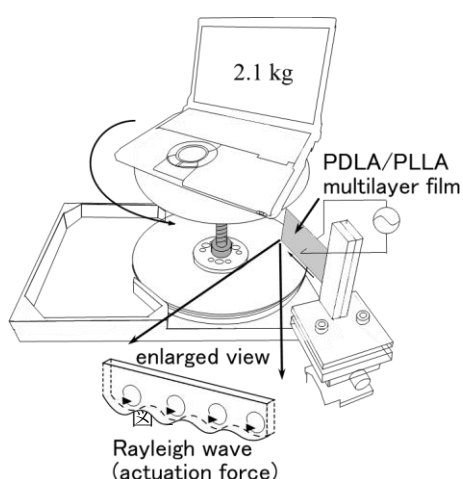


図 8

た。

(b)直動駆動

本研究最大の成果である。図9は平行なガ



図 9

イド上に厚み2mmの金属板を置いている。ここに二つの積層型トランスデューサを平行(東西)にならべた。更に南北にも積層型トランスデューサを配置した。その結果,東西の積層型トランスデューサを動かすと,この板は東西に直動し,更に南北の南積層型トランスデューサを駆動することでその金属板の向きを変えることに成功した。

以上のように実用的な場面を想定した実験を通して,この圧電性 PLLA と PDLA を積層した型トランスデューサは複雑な機構を用いない実用性に富む回転および直動ステージの駆動力として利用できる段階まで性能を上げることに成功した。今後は具体的な分野を決めた実用性の検討に進むことを期待したい。

(7)圧電ロール

当初考えていた研究テーマではないが,積層型トランスデューサ製造研究の中から生まれた大きな成果(トランスデューサではなく,センサ,エネルギーハーベスト分野)を記述しておく。圧電性高分子の圧電応答は,無機圧電体と同様に,フィルム変位を引き起こす応力に応じて電荷(電圧)が出力される。実際,マイクロ秒レベルで瞬間的に変化する動的な荷重が加わっても,しっかりとした出力電圧が得られる。しかし,他の圧電体同様に,数秒以上かけてゆっくりと変化する荷重や一定に保たれた荷重である静的な荷重を検知するには,積分回路等の助けを借りなければならない。しかしながら,高分子圧電体のインピーダンスが高く,更に積分回路自身の drift が発生し,簡便なシステムに仕上げるのは困難である。しかしながら,本研究では,一見圧電性の変質に反することにはなるが,付加回路なしで,静荷重時にも電圧を継続をする PLLA センサの実現を積層型トランスデューサ製造技術を発展させることにより,PLLA と PDLA の圧電積層フィルムをロール状に巻回した圧電ロールの開発に成功した(図10)。この開発し

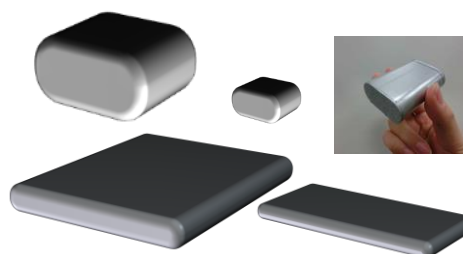


図 10

た圧電ロールは,PLLA と PDLA のフィルムを数百~数千の間で巻回したもので,持続的に荷重をかけることで電圧(最大電圧の90%以上)が最大2分程度持続するという,従来の実用無機圧電材料や有機圧電膜にはなかなか発現しない特性を有する圧電体である(図11)。無機圧電材料の弱点であった柔軟性の

欠如を克服するとともに、大面積への対応や、巻回数による圧電性能の持続時間の調整が可能となるため、エネルギーハーベストやセンサ用途としての全く新しい活用可能性を

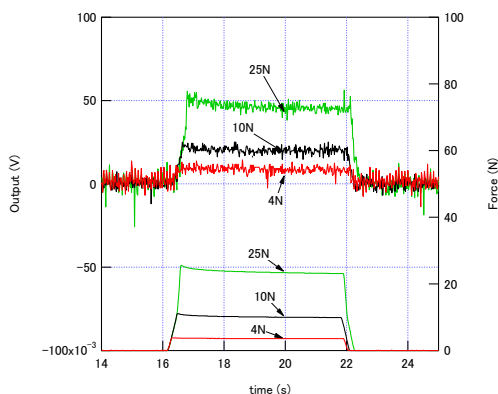


図 11

拡大することが期待できる。ここで得られた結果は圧電高分子に今までない次の実用展開に繋がる画期的な成果である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Y. Tajitsu, Y. Adachi, T. Nakatsuji, M. Tamura, K. Sakamoto, T. Tone, K. Imoto, A. Kato, and T. Yoshida, "Development of new force sensor using super-multilayer alternating laminated film comprising piezoelectric poly-L-lactic acid and poly-D-lactic acid films in the shape of a rectangle with round corners" Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 56, 10PG03-1-10PG05-5, 2017.
- ② Y. Tajitsu, "Poly(lactic acid) for Sensing Applications", Advances in Polymer Science, 査読有, 10, 1-18, 2017.
- ③ Y. Tajitsu, "Development of Environmentally Friendly Piezoelectric Polymer Film Actuator Having Multilayer Structure", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 55, 04EA07-1-04EA07-9, 2016.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 田實佳郎, 日本の伝統工芸の技が新たな wearable device を生み出す力に(招待講演), 2017 年第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017.
- ② Y. Tajitsu, Development of environmentally friendly piezoelectric polymer film actuator having multilayer structure, International Conference of Solid State Device and Materials, 2015.
- ③ Y. Tajitsu, Development of new soft actuator using piezoelectric bio-based polymer for realizing smart human-machine interface,

2nd International Conference on Bio-based Polymers and Composites, 2014.

[図書] (計 2 件)

- 1) J. Su and Y. Tajitsu, Springer, Piezoelectric and Electrostrictive Polymers as EAPs: Materials, 2016, 1417(213-245).
- 2) Y. Tajitsu, Springer, Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives, 2014, 507 (203-215).

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 1 件)

名称：アクチュエータ及びアクチュエータの駆動方法  
発明者：田實佳郎  
権利者：関西大学  
種類：特許  
番号：5852822  
出願年月日：2011 年 9 月 13 日  
取得年月日：2015 年 12 月 11 日  
国内外の別：国内, 国外

[その他]

ホームページ等  
<http://www2.ipcku.kansai-u.ac.jp/~tajitsu/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
田實佳郎 (TAJITSU YOSHIRO)  
関西大学・システム理工学部・教授  
研究者番号：00282236

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：

(4) 研究協力者 ( )