

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420174

研究課題名(和文) スマート材料のシステム論的モデル化による高効率エネルギーハーベスティング

研究課題名(英文) High-efficient energy harvesting using system-theoretic modeling of smart materials

研究代表者

高木 賢太郎 (Takagi, Kentaro)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60392007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：微小発電やエネルギー回生を応用目的に、スマート材料のモデリングについて研究を行った。本課題の特色は、対象とする材料や素子を入出力のあるシステムとして系統的に数理モデルを構築し、得られたモデルをもとにシミュレーションや設計に活かすことにある。イオン導電性高分子(IPMC)センサについて、電圧発生を表す物理モデルの構築・実験を行い、さらにそのモデルの単純化に成功した。誘電エラストマーを用いた発電では、SPCと呼ばれる回路の動作原理解明と最適設計法を示した。そして、電磁トランスデューサについて、新たな分布定数インピーダンスモデルの構築と、センサを用いないパラメータ推定手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Modeling of smart materials has been studied aiming at applications for energy harvesting. The novelty of this project is systematic mathematical modeling of smart materials based on control engineering: the obtained model has inputs and outputs and then can be used for simulation or/and designing harvesting devices. For IPMC sensors, experiments of the derived physics-based voltage sensing model have been conducted. Then, a simplified model of the physical model has been successfully derived. For dielectric elastomer generators, mathematical modeling and optimal design of self-priming circuit has been obtained. For electromagnetic transducers, a new distributed-parameter impedance model and sensor-less parameter estimation method have been proposed.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：スマート材料 エネルギーハーベスティング イオン導電性高分子 誘電エラストマー 電磁アクチュエータ

## 1. 研究開始当初の背景

スマート材料はアクチュエータやセンサとして用いることができる機能性材料のことであり、従来は圧電材料や形状記憶合金などが代表的なものであった。近年、材料開発の進展にともない、電気刺激にตอบสนองして変形する高分子材料、電場応答性高分子 (Electro-active polymer) が注目されてきている。電場応答性高分子は、従来の PVDF などの圧電高分子に比べても非常に大きな変形を生じるため、ソフトロボットやマイクロロボット、柔軟なメカトロニクス機器やマイクロマシンのためのアクチュエータとして今後期待されている。代表的な電場応答性高分子としてイオン導電性高分子貴金属接合体 (Ionic Polymer-Metal Composite, IPMC) と誘電エラストマー (Dielectric Elastomer, DE) がある。イオン導電性高分子は、柔軟・軽量であり数 [V] の電圧を加えると水中もしくは湿潤した状態で屈曲変形する。誘電エラストマーは空气中で動作し、数 [kV] の高電圧で伸展する。これらの高分子の開発から応用まで、国内外で研究が進められつつある。イオン導電性高分子は、90 年代に産総研においてイオン交換膜を用いた水の電気分解の研究をしている際に偶然発見されたことがきっかけで開発された日本発のアクチュエータである。また、誘電エラストマーは近年のスマート材料関連の国際会議で多くの研究報告がなされており、iPhone の体感ゲーム用ケースのアクチュエータ (ViviTouch, <http://www.vivitouch.com>) や、レーザースペckルリデューサ (Optotune, <http://www.optotune.com/products/laser-speckle-reducers/lsr-electronics>) などの商品化も始まりつつある。

スマート材料はアクチュエータとして用いられるだけでなく、センサとして用いることができる。圧電材料では、圧電効果を利用することでアンプなしでも変形に対して電圧が発生することが知られている。これを利用すると、ちょうど、電磁モータが発電機としても利用できるように、圧電材料を使って発電することができる。発電量はわずかであるが (たかだか [mW] オーダー)、電力をあまり消費しないところであれば利用が考えられ、センサネットワークや故障診断装置の電源などへの利用が期待されている。これまでにあまり利用されてこなかった、微小な環境からのエネルギー回収やその手法はエナジーハーベスティングと呼ばれ、近年応用が始まりつつある。研究代表者はこれまでに、圧電材料ならびに電磁アクチュエータのセンサレス振動制御を行ってきており、その手法は回路によって発電されたエネルギーを消散させるというものであった。その手法において、消散されていたエネルギーを蓄積することができれば、エナジーハーベスティングそのものになる。これが着想に至った経緯で

ある。

エナジーハーベスティングではこれまでに圧電材料や電磁アクチュエータが多く利用されてきたが、電場応答性高分子を利用する研究も新たに始まりつつある。電場応答性高分子のひとつである IPMC でも、変形させると微小な電圧が発生することが知られている。圧電材料が圧電効果によって電圧が発生するのは異なり、イオン交換樹脂膜内のイオン流がその原理であるが、水分量が変化しても電圧が発生することから、その原理はまだ十分に解明されているとはいえず、定量的なモデル化はまだ研究途上である。そしてエナジーハーベスティングについてもあまり報告がなされていない。

もうひとつの代表的な電場応答性高分子である Dielectric Elastomer, DE でも発電ができることが近年明らかにされた。圧電効果とは全く異なり、チャージされたキャパシタの静電容量を変化させることによってエネルギーを増減できる原理を利用して発電するものであり、電圧は数百～数千 [V], 1 [W] オーダーのエネルギーを取り出すことができる。しかし、約 1000 [V] の初期チャージをどうするのかといった問題や、DE の漏れ電流や静電容量を考慮した効率的な発電回路の設計についての研究報告はほとんどされていない。

## 2. 研究の目的

### (1) IPMC (Ionic Polymer- Metal Composite) について

IPMC (イオン導電性高分子) について、そのエナジーハーベスティングの可能性を明らかにし、その定量的な特性のモデル化をめざす。具体的には、実験により IPMC の発生する電圧を計測し、変形に対する入出力関係を同定する。そして、実験結果をもとに有力な物理的な原理を仮定した上で数理モデルを構築し、シミュレーションと比較することによって、エナジーハーベスティング特性の上限の見積もりと発電量の設計を行う指針を立てる。本研究では、アクチュエータ特性ではなく、センサ特性の計測とモデリングをシステムティックに行う。

### (2) 誘電エラストマーについて

DE (誘電エラストマー) のエナジーハーベスティングにおいて、その数理モデル化と、高効率な発電回路の設計を行うことである。これまでは、高電圧の初期チャージをしておき、外部キャパシタに充電する回路などが提案されているがあまり実用的であるとは言えない。高電圧の初期チャージが不要な方法として、近年、McKay, Anderson らによって低電圧からブーストしていく実用的な回路、Self-Priming Circuit が提案された。この回路をヒントに、力学的特性、電気的特性、電気機械変換特性、損失を考慮して発電回路の

高効率設計を行う。

(3) 圧電・電磁トランスデューサについて  
IPMC, DE のエナジーハーベスティングだけではなく、従来研究されている圧電材料や電磁アクチュエータも同様な手法でモデル化、解析、設計ができるはずである。とくに、モデル化とそのパラメータ推定、また、エナジーハーベスティングの回路の効率を上げることが目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) IPMC (Ionic Polymer- Metal Composite)について

IPMC (イオン導電性高分子) について、その特性計測からエナジーハーベスティングの可能性を明らかにし、その定量的な特性のホワイトボックスモデルによるモデル化をめざす。具体的には、実験により IPMC の発生する電圧を計測し、変形に対する入出力関係を同定する。そして、実験結果をもとに有力な物理的な原理を仮定した上で数理モデルを構築し、シミュレーションと比較することによって、エナジーハーベスティング特性の上限の見積もりと発電量の設計を行う指針を立てる予定である。

手順としてまず、IPMC 素子を作製する。これはすでに実績があるために、容易に行うことができる。続いて、アクチュエータの変形量から発生電圧もしくは発生電荷までの計測実験を行う。本研究では、アクチュエータ特性だけではなく、センサ特性の計測とモデリングをシステムティックに行うことに相当する。実験装置は、変位に対して、発生する電圧もしくは電流が計測できるような装置になっており、これに蓄電回路を取り付けることでエナジーハーベスティングが可能となる。

実験装置の作製と平行して、有限要素法ソフトウェアを援用した物理シミュレーションを行う。電場に関して、Poisson 方程式、電場とイオン流の支配方程式である Nernst-Planck 方程式、ポリマーの粘弾性など、相互に連成する複数の物理現象が存在し、完全な物理現象の理解は研究途上であると考えられる。そこで、アクチュエータのモデリングで近年発表された論文をもとに、最も支配的と考えられる現象である電場とイオン流の支配方程式から発電に関する物理シミュレータを構築する。シミュレーションと実験結果を比較し、数理モデルの妥当性を検証する。

そして、非線形な偏微分方程式で表される支配方程式を近似し、扱いやすい入出力表現である状態方程式を得る手法についても検討する。

(2) 誘電エラストマーについて

DE のエナジーハーベスティング特性の計

測とホワイトボックスモデリングについて研究を行う。まず、DE 材料準備と DE 素子の作製を行う。続いて実験装置と発電回路を作製し、実際にエナジーハーベスティングが可能であることを確認するとともに、その特性を計測する。実験装置は IPMC の場合と同様の装置を用いるが、IPMC とはサイズや形状が異なり、また高電圧のために隔離した実験装置を用いる。

また、理論的な SPC の動作原理解明のため、DE を可変キャパシタとしてモデル化を行い、数理モデルを構築する。

(3) 圧電・電磁トランスデューサについて  
パラメータ推定を行う方法を検討するとともに、モデル化において重要となるインピーダンス周波数特性のもつ分布定数特性を表すモデルを構築する。

エナジーハーベスティングのための回路設計を行う。従来すでにいくつかの回路が提案されているが、どのような回路が最もよいのか、十分に検討がなされているとはいえないようである。また、PWM などのスイッチングによって電圧を制御するようであるが、その制御則についても新たに数理モデルをもとに考察する。

### 4. 研究成果

(1) IPMC (Ionic Polymer- Metal Composite)について

IPMC のインピーダンスモデリングとエネルギー回生のために有効な駆動法、IPMC のセンサ機能の物理モデル化、IPMC の物理モデルの簡略化の3点に関して研究を行った。内部インピーダンスを正確にモデル化することは、微小な発電量を取り出すためには不可欠である。インピーダンスモデリングでは、制御工学の知見に基づき、モデル化誤差や湿潤の度合いが変動することを非構造的な動的な不確かさとして表すことを提案した。

IPMC の発生電圧を表すモデルについて検討を行った。物理モデルについて、共同研究者の産総研の安積欣志博士のグループとともに研究を行い、曲げ変形に対する電場とイオン流、溶媒流に関する方程式を得た。導出された物理モデルは、湿度 (IPMC の含水率) をパラメータとして含んでおり、環境の水分によって応答が異なる現象が再現できるものとなっている。実験では、変形によって生じる電圧を計測し、ステップ応答と調和応答について特性を調べた。また、電圧計測に比べて比較的計測しやすい電流についても計測を行った。

そして最終年度では、得られたモデルをもとに、簡略化されたモデルの提案を行った。簡略化は、非線形項の線形化と単純な空間離散化によって行う。得られたモデルは、制御工学で標準的な形式である有限次元線形時

不変系の状態方程式として表現される。得られた状態方程式モデルのシミュレーション結果と、もとの偏微分方程式モデルを有限要素シミュレータで解いた結果と比較したところ、両者はよい一致を示した。

以上の成果は、国内外の学会発表ならびに、学術雑誌に掲載された。

#### (2) 誘電エラストマーについて

McKay らによって従来提案されている発電回路、Self-Priming Circuit に注目した。しかしながら、過去の文献では動作原理の解析や最適設計などは行われていないようであった。そのため、可変キャパシタとしてモデル化を行い、動作原理の解明と最適設計を行った。

また、発電回路を用いた応用についても検討を行い、間欠的に温度を計測し無線送信が可能であることを実験により実証した。

以上の成果は、国内外の学会ならびに、学術雑誌に掲載された。

#### (3) 圧電・電磁トランスデューサについて

センサを用いずに電磁トランスデューサのパラメータ推定を行う方法を提案した。さらに、渦電流の影響を考慮することによって、実験で観察されるインピーダンスの分布定数系としての周波数応答を説明しうる、渦電流の分布を考慮した、新しいモデルを構築した。

また、エネルギーハーベスティングの回路について解析を行った。電流を最大化する規範に基づき、電磁アクチュエータの発生する電圧を昇圧する回路について理論的な解を得た。

さらに、電磁トランスデューサと対になる圧電トランスデューサにおいても、発電された電力を用いて振動制御する手法(シャントダンピング)について検討を行った。

以上の成果は、国内外の学会発表ならびに、学術雑誌への投稿を行っている。

#### 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)

P. Illenberger, K. Takagi, H. Kojima, U. Madawara, I. Anderson, A mathematical model for self priming circuits: getting the most from a dielectric elastomer generator, IEEE Transactions on Power Electronics, 査読有, 2016, doi.org/10.1109/TPEL.2016.2627046

Z. Zhu, T. Horiuchi, K. Takagi, J. Takeda, L. Chang, K. Asaka, Effects of cation on electrical responses of

ionic polymer-metal composite sensors at various ambient humidities, Journal of Applied Physics, 査読有, vol.120, Issue.8, p.084906, 2016, doi.org/10.1063/1.4961732

Z. Zhu, L. Chang, T. Horiuchi, K. Takagi, A. Aabloo, K. Asaka, Multi-physical model of cation and water transport in ionic polymer-metal composite sensors, Journal of Applied Physics, 査読有, vol.119, Issue.12, p.124901, 2016, doi.org/10.1063/1.4944647

##### [学会発表](計 12 件)

J. Takeda, K. Takagi, Z. Zhu, K. Asaka, Study on simplification of a multi-physical model of IPMC sensor generating voltage as sensing signal, Smart Structures/NDE, 2017/3/25-30, Portland, USA

T. Ikegame, K. Takagi, T. Ito, H. Kojima, H. Yoshikawa, Energy harvesting by dielectric elastomer generator and self-priming circuit: verification by radio transmission, Smart Structures/NDE, 2017/3/25-30, Portland, USA

武田 惇, 高木 賢太郎, 朱 子才, 安積 欣志, IPMC センサの物理原理に基づく状態空間モデルに関する研究 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2016), 2016 年 12 月 15 日~17 日(発表 15 日), 札幌コンベンションセンター, 札幌

池亀 透, 高木 賢太郎, 伊藤 貴雅, 小嶋 宏紀, 吉川 均, 誘電エラストマーを用いたエネルギーハーベスティング: 無線送信による実証 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2016), 2016 年 12 月 15 日~17 日(発表 15 日), 札幌コンベンションセンター, 札幌

一藁 秀行, 高木 賢太郎, 池亀 透, 仮想アドミタンス回路による圧電シャント制振のための電圧 電荷変換回路の安定性について, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2016), 2016 年 12 月 15 日~17 日(発表 15 日), 札幌コンベンションセンター, 札幌

池亀 透, 高木 賢太郎, 井上 剛志, 軸屋 一郎, 電磁トランスデューサのインピーダンスのモデル化に関する一考察: 離散化された渦電流を考慮した集中定数モデルの導出, 日本機械学会 2016 年度年次大会 2016 年 9 月 11 日 ~ 14 日(発表 14 日), 九州大学, 福岡

池亀 透, 高木 賢太郎, 井上 剛志, 軸屋 一郎, 電磁トランスデューサのインピーダンスのモデル化に関する一考察: 渦電流の考慮による非有理伝達関数の導出, 日本機械学会 D&D Conference 2016, 2016 年 8 月 23 日 ~ 26 日(発表 25 日), 山口大学 常盤キャンパス, 山口

Z. Zhu, K. Asaka, K. Takagi, A. Abloo, T. Horiuchi, A multi-physical model for charge and mass transport in a flexible ionic polymer sensor, Smart Structures/NDE, 2016/3/20-25, Las Vegas, USA

小嶋 宏紀, 高木 賢太郎, Self-Priming Circuit を用いた誘電エラストマーによる発電に関する考察 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2015), 2015 年 12 月 14 日 ~ 16 日(発表 16 日), 名古屋国際会議場, 名古屋

T. Ikegame, K. Takagi, I. Jikuya, Efficiency Analysis of Energy Harvesting Using an Electromagnetic Transducer and a Pulse Width Modulated Step-up Chopper Circuit, The 26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST 2015), 2015/10/14-16, 神戸ファッションマート, 神戸

T. Ikegame, K. Takagi, T. Inoue, I. Jikuya, Sensor-less parameter estimation of electromagnetic transducer and experimental verification, Smart Structures/NDE, 2015/3/8-13, San Diego, USA

重松宏樹, 高木賢太郎, 安積欣志, IPMC アクチュエータの不確かさを考慮したインピーダンスモデリングについて, 日本ロボット学会第 31 回学術講演会 2014 年 9 月 4 日 ~ 6 日, 九州産業大, 福岡

出願状況(計 1 件)

名称: 発電装置  
発明者: 伊藤貴雅, 他 5 名, 高木賢太郎, 小嶋宏紀  
権利者: 住友理工株式会社, 国立大学法人名古屋大学  
種類: 特願  
番号: 2015-34770  
出願年月日: 2015 年 2 月 25 日  
国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

高木 賢太郎 (TAKAGI, Kentaro)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60392007

##### (2) 研究分担者

安積 欣志 (ASAKA, Kinji)  
産業技術総合研究所・無機機能材料研究部門・グループ長  
研究者番号: 10184136

井上 剛志 (Inoue, Tsuyoshi)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70273258

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

##### (4) 研究協力者

( )

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕