

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13713

研究課題名（和文）革新的スマート制振プレートの実現と高い電気機械結合時の制振解析に関する学理の開拓

研究課題名（英文）Realization of smart damping plate and development of analytical methodology in the highly-coupled system

研究代表者

浅沼 春彦（Asanuma, Haruhiko）

金沢大学・フロンティア工学系・助教

研究者番号：10757298

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大振幅の振動を、大面積且つ広周波数帯域に渡って自律的に制振することが可能な圧電型スマート制振プレートの実現を目指して、その機械-電気特性の解析技術の確立と基礎的な検討を行った。非線形の圧電方程式を基にした新しい機械-電気の支配方程式と開発した連成解析法により、複雑なスマート制振プレートの性能を予測する技術を確立した。また、自律駆動するスイッチ回路と周期的に圧電素子が配置された構造を用いて、大面積且つ広周波数帯域渡って制振が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、非線形の圧電方程式を基にした新しい機械-電気支配方程式の導出、その支配方程式と複雑な電子回路を組み合わせる手法を開発し、線形の圧電方程式を基にした従来の解析手法では出来なかった圧電型スマート制振プレートの機械-電気特性を再現することが出来た。特に、圧電型スマート制振プレートという比較的新しい圧電デバイスの解析に、非線形の圧電方程式の重要性を説いた点が学術的に新しい知見である。他の圧電デバイスの開発者にこの解析手法を広めていきたいと考えている。

研究成果の概要（英文）：In order to realize a piezoelectric smart damping plate, which can control large-amplitude and large-area vibration over wide frequency bandwidth autonomously, I developed an analytical methodology for predicting the electromechanical properties and performed an early-stage examination. I succeeded in establishing a way for predicting the complex electromechanical properties of the smart damping plate, by deriving a new governing equation based on the nonlinear piezoelectricity and developing the two-way coupled simulation technique. Then, I verified that the smart damping structure employing the self-standing switch circuits and the periodic structure successfully control the structural vibration at higher vibration modes.

研究分野：振動制御

キーワード：圧電制振 セルフセンシング 非線形の圧電方程式

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

圧電体を用いた制振技術は軽量、省スペース、精密な制振を得意とし、分析装置や生産装置の防振、車両の遮音(騒音低減)パネルへの応用が検討されている。従来の圧電体を用いたアクティブ制振技術は、別個に備えた加速度/変位センサの信号を解析し、高速信号制御装置から圧電材へ電圧信号を送って対象物の振動を制御する。近年、圧電体を制振用のアクチュエータとしてだけでなく変位センサとして併用し、更に、圧電体に生じるエネルギーの一部を消費して電子回路を自律駆動させ制振を行う新しい技術に高い注目が集まっている。回路は、センサ回路、スイッチ回路、コイルから主に構成される。変位が最大/最小値に達すると自律的にスイッチが閉じ、コイルで圧電電圧をさせて大きな電流を瞬時に回路に流し、エネルギーを散逸させて振動を抑制する。この回路は、Self-sensing Synchronized Switch Damping on Inductor (SSDI)または制振性能の向上ため直流電源を付加した Self-sensing Synchronized Switch Damping on Voltage (SSDV)と呼ばれる。本研究では電源を一切使用しない Self-sensing SSDI を扱う。SSDI を用いた圧電制振技術の機械-電気特性の解析には、線形の圧電方程式を基にした1自由度系モデルが幅広く利用されている。回路内のダイオードとトランジスタを単純な On/Off スイッチでモデル化し、電子素子の寄生容量を無視する近似を行うことで、1自由度系モデルと回路の連成解析から変位と電圧の解析解を導いていた。しかしながら、加振加速度/加振力が大きくなるほど(または、圧電構造物の振動変位が上がるほど)、圧電構造物の共振周波数は低周波数へシフトし、変位や電圧の周波数特性のピークが丸みを帯びる非線形現象が観測されるが、従来の解析モデルでこの現象を説明することは出来ず、性能予測が不正確で構造設計が困難であった。また、SSDI を用いてより高次の振動モードを抑制する研究が進められているが、高価な高速信号制御装置を用いて回路の制御を行っており、自律型の制振技術ではなかった。

2. 研究の目的

本研究では、大振幅の振動を、大面積且つ広周波数帯域に渡って自律的に制振することが可能な圧電型スマート制振プレートの実現を目指して、その機械-電気特性の解析技術の確立と基礎的な検討を行う。

(1) 初めに、圧電片持ち梁構造を用いて、スマート制振プレートの新しい機械-電気支配方程式の導出、その方程式と複雑な電子回路を連成解析する技術の確立に取り組む。非線形の圧電方程式を基にした新しい機械-電気支配方程式を導出し、その支配方程式とトランジスタを多用する複雑な自律駆動センサ/スイッチ回路を連成解析する手法を開発する。

(2) 次に、高次の振動モードの制振を可能にするスマート制振プレートの基礎検討を行う。制振性能を強化する自律駆動スイッチ回路の設計に取り組み、1次より高い振動モードの制振を実証する。

3. 研究の方法

(1) 圧電型スマート制振プレートの機械-電気特性の解析技術の確立

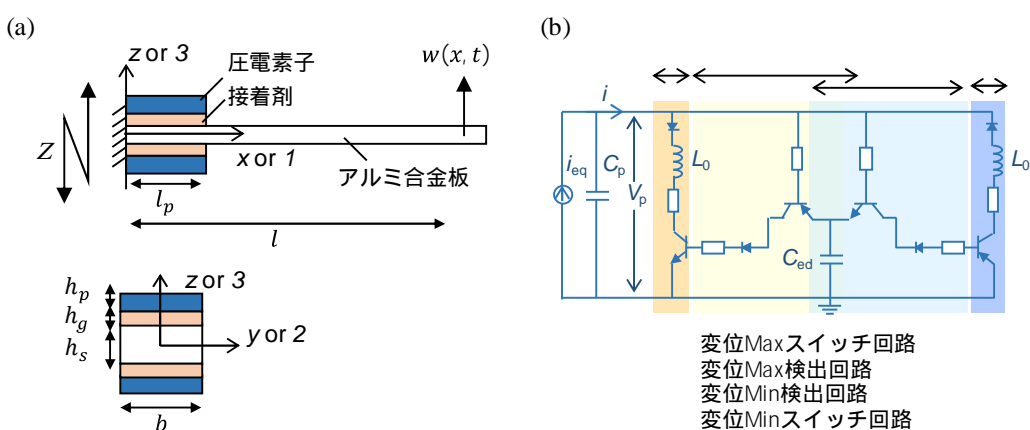


図1 圧電片持ち梁構造と高效率 Self-sensing SSDI 回路

図1に圧電片持ち梁構造と高效率 Self-sensing SSDI 回路を示す。圧電片持ち梁は、構造用アルミニウム合金板 (A6061、 $102 \times 20 \times 1.0 \text{ mm}^3$) の固定端付近に直列バイモルフの形態で圧電材 (富士セラミックス社、C-6材、 $20 \times 20 \times 0.2 \text{ mm}^3$ /個) が貼り付けられ構成される。本研究の Self-sensing SSDI 回路は、トランジスタをスイッチと整流器として併用することで回路内のキャパシタ数を削減し、圧電電圧の損失を抑え制振性能を向上させている。変位が最大/最小値に達すると、キャパシタ C_{ed} から放電が起こり、トランジスタが On となり、瞬時にスイッチトランジスタも On となる。これにより、コイル L_0 と圧電キャパシタ C_p の電氣的パスが生まれて

スイッチ回路に大きな電流が流れ、エネルギーを散逸させ振動を抑制する。図2に提案の機械-電気支配方程式の導出手順を示す。本研究では、「圧電電圧は分極に必要な抗電圧より十分小さい」、「圧電素子の弾性定数と圧電定数は歪みの2次関数で表わされる」という実験で観測される現象を取り込んだ von Wagner タイプの非線形圧電方程式を採用した。この圧電方程式を元に、系全体の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを求めてラグランジアンを算出する。また、加振加速度が上がるほどダンピングが増大する現象が実験で観測されるため、Stantonらが提唱する非線形ダンピング項を非保存力に導入する。次いで、ハミルトンの原理より、ラグランジアンと非保存力項からたわみ w に関する機械-電気方程式を導き、固有モード解析と質量規格化を行って方程式をモード座標で還元し、新規の機械-電気支配方程式を導出する。方程式の線形項の係数はカタログの材料特性から求められるが、非線形項の係数は、ハーモニックバランス法を用いて、実験から得た変位と圧電電圧の加速度依存特性から推定する。上述の手順を経て、圧電型スマート制振プレートの新規の機械-電気支配方程式が決定される。特に、従来の支配方程式には表れない変位に依存した非線形項が実験で観測される非線形現象を再現する。

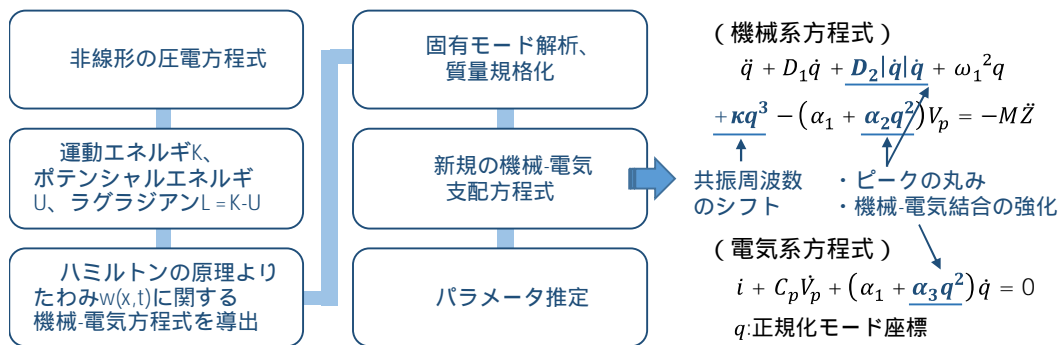


図2 提案の機械-電気支配方程式の導出手順

提案の機械-電気支配方程式は非線形項を含み、その支配方程式とトランジスタを多用する複雑な Self-sensing SSDI 回路を連成解析して解析解を導くことは困難である。また、従来の解析手法のように、回路内のダイオードやトランジスタを単純な On/Off スイッチでモデル化し、電子素子の寄生容量を無視する近似を行うと正確な特性は再現できない。本研究では、機械力学と電子回路の解析で双方向にフィードバックをかけて計算を進める双方向連成解析法を用いて、その複雑な機械-電気特性の再現を試みた。

図3に、3種の加速度強度における、オープンサーキット状態(a)(b)及び Self-sensing SSDI 回路(c)(d)を接続した圧電片持ち梁の変位と圧電電圧の周波数特性を示す。実験データは点、解析値は線で表わされている。双方向連成解析は数値計算ソフトと回路シミュレータを用いて実行し、また、現実の回路素子の特性を再現する為に寄生成分を含んだパラメータを各素子に代入した。

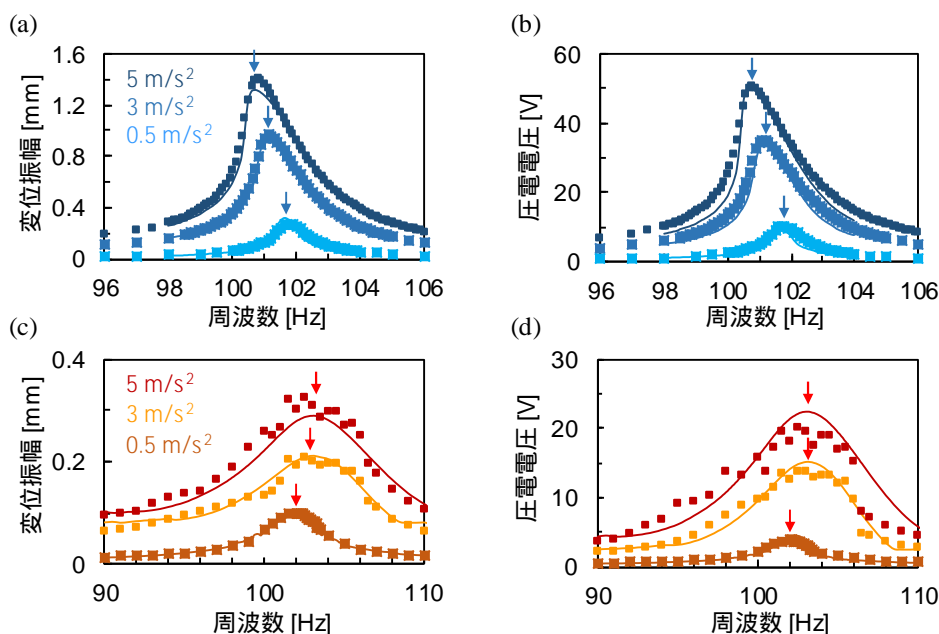


図3 オープンサーキット状態(a)(b)及び SSDI 回路(c)(d)の変位と圧電電圧の周波数特性

図 3(a)(b)に示すように、提案の解析手法は実験結果と同等の特性を示し、従来の解析手法では再現できなかった共振周波数のシフトを再現している。図 3(c)(d)に示すように、解析結果は圧電型スマート制振プレートの複雑な機械-電気特性をおおよそ再現している。特にユニークな点は、オープンサーキット状態で観測された共振周波数のシフトが SSDI 回路を接続すると消失する点である。これは、機械-電気結合状態の強化と SSDI 回路による制振力の増大によるもので、系の剛性が高くなるために生じる。よって、非線形の圧電方程式を導入した新しい機械-電気支配方程式の導出、その方程式と Self-sensing SSDI 回路を解く双方向連成解析法を開発することで、圧電型スマート制振プレートの複雑な機械-電気特性の再現に初めて成功した。

(2) 高次の振動モードの制振を可能にするスマート制振プレートの基礎検討

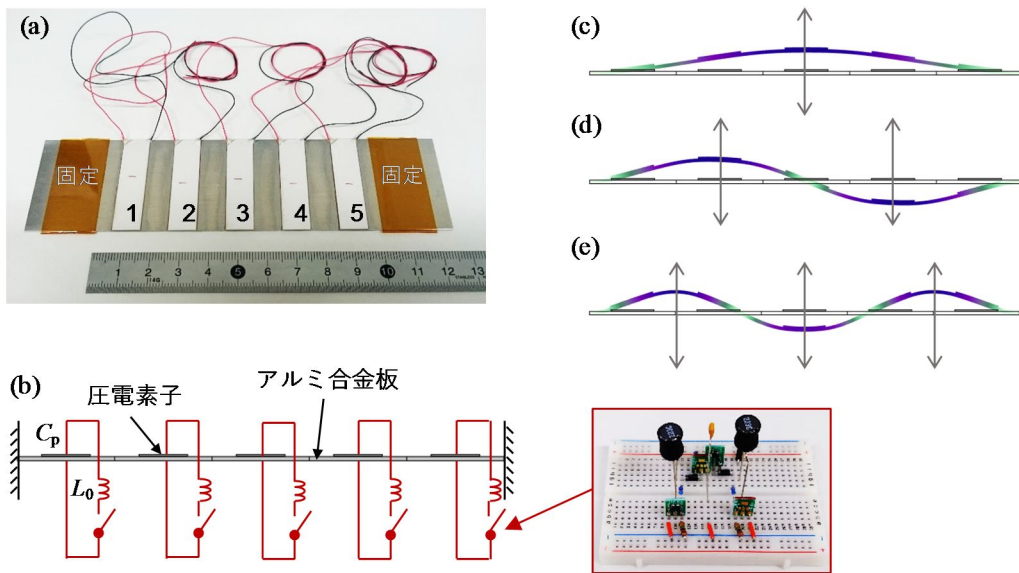


図 4 (a)(b)周期構造のスマート制振プレートと(c)1次、(d)2次、(e)3次の振動モード

図 4 に、周期構造を用いた圧電型スマート制振プレートと各振動モードの形状を示す。圧電体（富士セラミックス、C-6、 $40 \times 10 \times 0.3 \text{ mm}^3$ ）はアルミ合金板（A6061、 $40 \times 100 \times 0.8 \text{ mm}^3$ ）の上に5つ均等に配置され、各圧電体には高効率 Self-sensing SSDI 回路が接続されている。各振動モードの共振周波数は、1次が 332、2次が 923、3次が 1,847 Hz である。圧電電圧は板の端部で、振動変位は各振動モードで最大変位が得られる箇所計測した。周期構造を用いた先行研究は存在するが、高速信号制御装置でスイッチが制御されており、制振性能も高くない。本研究では完全自律型で高次の振動モードの制振を試みる。高い周波数でもスイッチが素早く作動して制振が行えるように、先に開発した連成解析を使用して素子の選定や回路の設計を行った。

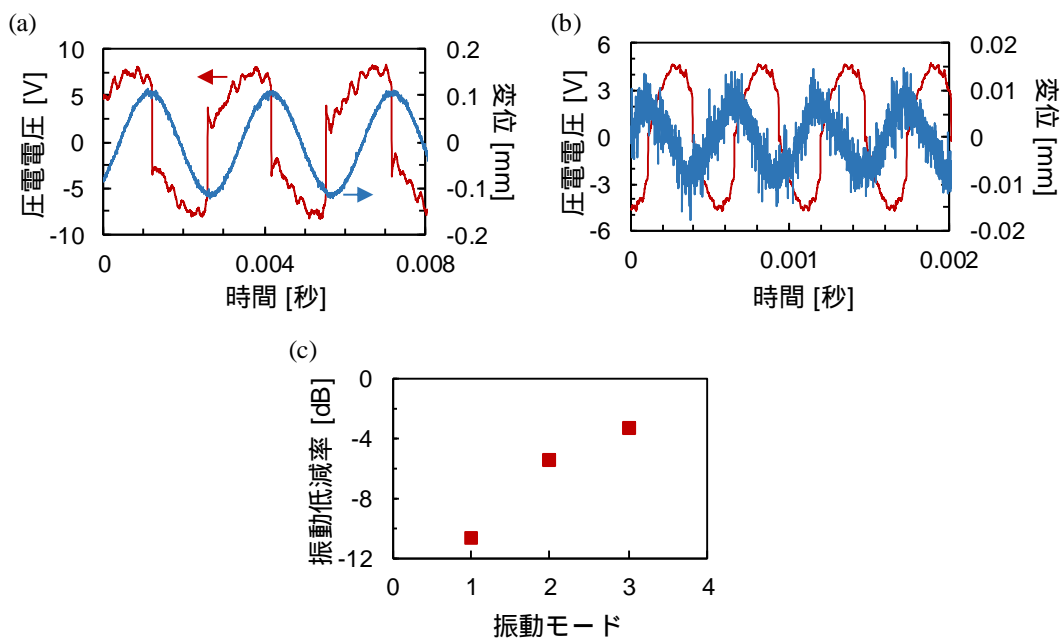


図 5 (a)1次と(b)3次の振動モードの代表的な波形と(c)各振動モードの制振性能

図 5 に、1 次と 3 次の振動モードの代表的な波形と各振動モードにおける制振性能を示す。1 次、2 次、3 次振動モードにおける変位の振動低減率は、それぞれ 71% (-11 dB)、47% (-5.5 dB)、32% (-3.3 dB) であった。したがって、完全自律駆動で 1,847 Hz の高次の振動モードの制振が可能であることを実証した。一方で、高次の振動モードほど振動変位が小さく、回路の自律駆動に十分な電力を得ることが困難で、1 次の振動モードほど高い制振性能が得られなかった。今後の課題として、1 次の振動モードと同等の制振性能を実現するメタマテリアル構造の設計、回路の集積化による超低消費電力化などが考えられる。

4 . 研究成果

(1) 圧電デバイスの性能解析には線形の圧電方程式を基にした 1 自由度系モデルが幅広く利用されているが、圧電型スマート制振プレートの複雑な機械-電気特性を正確に再現することは出来ない。本研究では、非線形の圧電方程式を基にした新しい機械-電気支配方程式を導出し、その支配方程式とトランジスタを多用する複雑な SSDI 回路を連成解析する手法を開発して、初めてその特性の再現に成功した。特に、圧電型スマート制振プレートという比較的新しい圧電デバイスの解析に、非線形の圧電方程式の重要性を説いた点が学術的に新しい知見である。非線形の圧電方程式は様々なモデルが存在し、どのモデルが最も実験を再現するのは未だ分かっていない。今後、大きな学問分野として芽吹くように本研究成果の認知に努めていく。

(2) 板に周期的に圧電素子が配置された圧電スマート制振プレートにおいて、キロヘルツオーダーの高次の振動を自律駆動 SSDI 回路で制振可能である事を実証した。国内外の他の研究では高価な高速信号制御装置や外部電源を用いた報告が多く、完全自律型で制振を実証した点が応用上の重要な知見である。今後、開発した解析手法を用いて新しい構造や回路の設計に取り組み、高次の振動で 70%以上の振動低減率を目指していく。

<引用文献>

B. Bao, and W. Tang, "Semi-active vibration control featuring a self-sensing SSDV approach," *Measurement*, vol. 104 (2017) pp.192-203

B. Bao, D. Guyomar, M. Lallart, "Vibration reduction for smart periodic structures via periodic piezoelectric arrays with nonlinear interleaved-switched electronic networks," *Mech. Syst. Signal Process*, vol. 82 (2017) pp. 230-59

A. M. Eltamaly, K. E. Addoweesh, "A Novel Self-Power SSHI Circuit for Piezoelectric Energy Harvester," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32 (2017) pp. 7663-73

U. von Wagner, P. Hagedorn, "Piezo-beam systems subjected to weak electric field: Experiments and modelling of non-linearities," *J. Sound Vib.*, vol. 256 (2002) pp. 861-72

S. C. Stanton, A. Erturk, B. P. Mann, D. J. Inman, "Resonant manifestation of intrinsic nonlinearity within electroelastic micropower generators," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97 (2010) 254101

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Asanuma Haruhiko, Komatsuzaki Toshihiko	4. 巻 144
2. 論文標題 Nonlinear piezoelectricity and damping in partially-covered piezoelectric cantilever with self-sensing synchronized switch damping on inductor circuit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 106867 ~ 106867
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松林 裕一郎 浅沼 春彦 小松崎 俊彦 岩田 佳雄
2. 発表標題 高い電気機械結合状態における 圧電スマート制振プレートの性能予測
3. 学会等名 日本機械学会 2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松林 裕一郎 浅沼 春彦 小松崎 俊彦 岩田 佳雄
2. 発表標題 圧電材とセミアクティブ制振回路を利用した スマート制振板の解析技術
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第56期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅沼 春彦 小松崎 俊彦
2. 発表標題 圧電型スマート制振板の電気機械連成特性
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅沼 春彦 小松崎 俊彦
2. 発表標題 圧電制振板の多モード制振の検討
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考