

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360125

研究課題名（和文）圧電単結晶チップの共振を利用して電圧変換を行うコイルレス超小型 AC アダプタの実現

研究課題名（英文）Achievement of Miniaturized and Inductor-less AC-DC converter Using Mechanical Resonance of Single-Crystal Piezoelectric Small-Thin Rectangular Plate

研究代表者

広瀬 精二 (HIROSE SEIJI)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70007201

研究成果の概要（和文）：圧電単結晶の機械振動を利用した圧電トランスを用い、小形軽量・高効率で巻線のない AC アダプタの実現を目的とする。解析と実験により 95% 程度の高効率のトランスが実現できることを見出した。次に、圧電トランス駆動用 MOSFET スイッチング回路を高周波で使用する方法を探索した。また、圧電トランスの実動状態において生じる非線形現象による不安定現象を制御しながら実動特性を測定する計測・制御システムを実現した。

研究成果の概要（英文）：This study aims to achieve a miniaturized and high efficiency AC-DC converter without the wiring, by using the single-crystal piezoelectric transformer. As the results of the analysis and measurement, it has been found that the piezoelectric transformer with very high efficiency of about 95% can be achieved. Next, for obtaining the high-performance driving circuit of the piezoelectric transformer, the switching characteristics of the MOSFET switching circuits have been examined in detail in the high-frequency range from around 100kHz to 900kHz. Moreover, the measuring system has been constructed to measure precisely the performance characteristics of the piezoelectric transformer, by controlling the unstable non-linear phenomena appearing during the practical high-power driving of the piezoelectric transformer.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学、電力変換、電気機器

キーワード：電気機器

## 1. 研究開始当初の背景

ノートパソコンなどに用いられている AC アダプタは、電磁トランスを用いているので大きくて重く、電力効率が悪い、発火の恐れがある、など課題が多く小形・高効率で安全な AC アダプタが切望されている。研究代表者は液晶ディスプレイのバックライト点灯

電源に用いる圧電トランスの実用化の実績がある。この圧電トランスの研究の蓄積を AC アダプタに応用して、小形・高効率で可燃性の AC アダプタを実現する、という着想に至った。全世界で膨大な数に上る AC アダプタを圧電トランスを用いて高効率化すれば、地球規模の省エネが可能となる。また、

研究代表者が明らかにしたように圧電単結晶はハイパワーまで低損失で使える優れた材料であり、鉛を含有している通常のセラミックス系の圧電材料に対して地球環境汚染防止に寄与する点も重要な利点である。

## 2. 研究の目的

現在ノートパソコンなどに使われている大きくて重く、電力効率の悪い電磁トランス式の AC アダプタを小形軽量化、高効率・省エネ化を目的とする。方式は、電磁トランス式に代えて、圧電単結晶チップの機械的共振を介して入・出力の電極面積の違いにより電圧のステップダウンを行う圧電トランス方式を用いる。

具体的な項目に対する目的を以下に記す。

- (1) 圧電単結晶  $\text{LiNbO}_3$  を用いた圧電トランス方式 AC アダプタの最適構造・寸法ならびに電力効率などの性能を明らかにする。
- (2) 回路全体の小形化・コンパクト化のために、高効率スイッチング駆動回路の研究を行う。
- (3) 圧電単結晶  $\text{LiNbO}_3$  チップのパワー限界の実測のための高安定・高精度なパワー特性計測システムを構築する。

## 3. 研究の方法

以下に研究の項目と方法を示す。

- (1) 圧電トランス構成法ならびにトランス特性の解析・実験
  - ① ラーメモード基本振動の特性解析・評価
  - ②  $2 \times 2$  次ラーメモード利用圧電トランス構成
  - ③  $3 \times 3$  次ラーメモード利用圧電トランス構成
  - ④  $2 \times 3$  次ラーメモード利用圧電トランス構成
  - ⑤ 有限要素法の連成場解析の実施
- (2) 圧電トランスのスイッチング励振回路の作製・評価(MOSFETによるスイッチング)
  - ① 数 10kHz 帯における特性
  - ② 数 100kHz 帯における特性
  - ③ インダクタンス挿入による高周波帯における効率の改善
- (3) 圧電トランスのパワー試験計測システム
  - ① アナログ方式計測システムの最適化
  - ② ソフトウェア方式計測システムの実現

## 4. 研究成果

圧電単結晶  $\text{LiNbO}_3$  利用圧電トランスを用いた小形高効率の AC アダプタ実現のために、(1) 圧電トランス構成法ならびにトランス特性の解析・実験、(2) 圧電トランスのスイッチング励振回路の作製・評価、(3) 圧電トランスのパワー試験自動計測システムの最適化な

らびに新規手法（ソフトウェア制御）の提言・確立、の項目について精力的に研究を行ってきた。これらの成果について以下に記す。

### (1) 圧電トランス構成法ならびにトランス特性の解析・実験

① ラーメモード基本振動の特性解析・評価：図 1 に示す  $X$  軸  $\theta^\circ$  回転  $Y$  板の圧電単結晶  $\text{LiNbO}_3$  平板を用いる。この平板の表裏の主平面に金蒸着電極を付け、電気的に駆動すると、図 2 のようなラーメモードと呼ばれる面内屈曲振動の共振が強勢に励振される。この共振は図 2 に示すように、 $X$  軸と  $Y$  軸方向の変位の極性が逆であり、また歪も極性が逆となっている。このような共振は圧電定数に異方性のある圧電単結晶を用いると強勢に励振される。図 2 の振動パターンは有限要素法解析ソフト ANSYS による解析結果である。

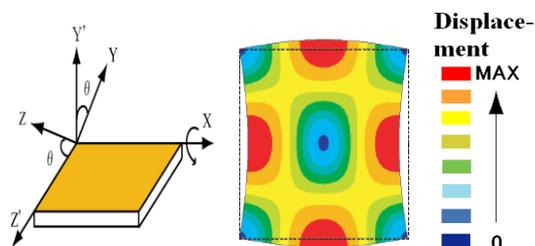


図 1.  $X$  軸回り  $\theta^\circ$  回転  $Y$  板

図 2. ラーメモード基本振動

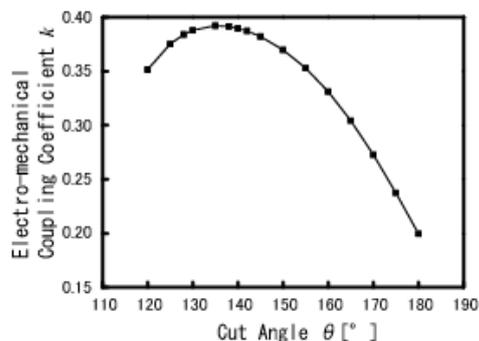


図 3. 電気機械結合係数  $k$  のカット角依存性

以下、特に断らない限り、解析結果は ANSYS によるものとする。図 2 において、中心部とコーナー 4 点は振動変位がゼロとなる振動節点である。文献[1]によれば、 $\theta = 155^\circ$  回転  $Y$  板において中心部とコーナー 4 点で振動変位が完全にゼロとなることが示されている。しかし、我々の解析結果によれば、図 3 に示すように、共振振動が強く励起される割合（効率）を表わす電気機械結合係数  $k$  は  $\theta$

$\theta = 138^\circ$  で最大となっており、 $\theta = 155^\circ$  では10%程度低い値となっている。また、 $\theta = 128^\circ$  回転 Y 板は、弾性表面波フィルタとして大量に使用されており、コストが低く抑えられる利点がある。このとき、 $k$  は  $\theta = 138^\circ$  の値からわずか2%程度低下するに過ぎず、十分高い  $k$  で使用することができる。また、 $\theta = 128^\circ$ 、 $138^\circ$  においては、コーナーの点に若干の変位が現れるが、中心部の変位は完全にゼロである。このことは、後述する  $2 \times 2$  次モード共振などでは、完全な節点となる共振モードの中心部が4点あり支持固定が容易となる。以上の点は本研究により新しく発見された貴重な成果である。

\*文献[1] 中村, 熊坂: 電子情報通信学会論文誌 C-I, Vol. J78-C-I, No. 11, 494-499 (1995. 11)

②  $2 \times 2$  次ラーメモード利用圧電トランス構成:

図2の振動パターンが縮小されて、同じ寸法の正方形板に4つのパターンが現れる高次振動である  $2 \times 2$  次ラーメモードを利用して、入力部と出力部電極を設けた圧電トランスを図4に示す。電極を4分割し、1枚を入力部、3枚を誘起電荷の極性も考慮して並列接続して出力部としている。この構成は文献[1]で構想のみ提案されていたが、実際の

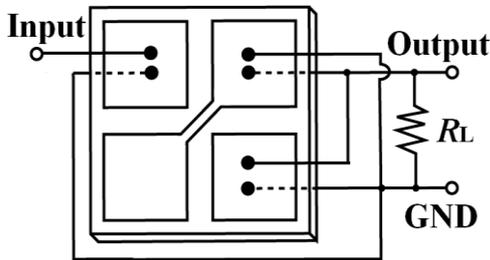


図4. 圧電トランス構成  
( $2 \times 2$  次ラーメモード)

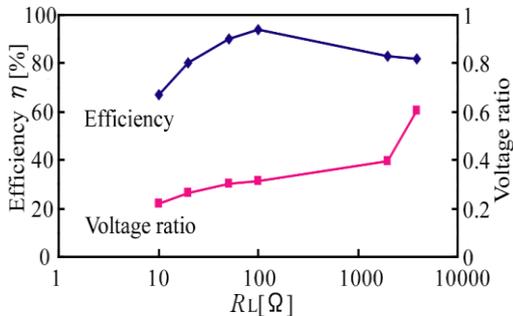


図5.  $\text{LiNbO}_3$  圧電トランス ( $2 \times 2$  次ラーメモード) の効率測定結果

成果は本研究において初めて得られた。

図2の4隅では変位がゼロとなっているが、図2からもわかるように回転変位が存在するので完全な振動節点とはならない。しかし、図4の構成では完全な振動節点が、正方形板中心の1点と4組の分割電極の中心部4点の合わせて5ヶ所現れるが、そのうち支持するのに十分な数である3ヶ所を支持固定して解析と実験を行った。支持することによって、解析ならびに実験において、スプリアス振動(不要振動)を抑圧できる結果が得られた。図5は効率 $\eta$ ならびに電圧比の測定結果であり、効率は最大で $\eta = 94\%$ の高効率が得られた。このとき、共振尖鋭度は  $Q \approx 7000$  と高い値であった。

③  $3 \times 3$  次ラーメモード利用圧電トランス構成:

図2の振動パターンが縮小されて、9つのパターンが現れる新しく考案した構成である  $3 \times 3$  次ラーメモード利用の圧電トランスを図6に示す。入力部は1枚の電極、出力部は8枚の電極を並列接続した構成である。この結果、 $Q \approx 9000$ 、 $R_L = 20 \Omega$  で効率 $\eta \approx 89\%$ 、電圧比=0.1の降圧トランスの良好な性能が得られた。

④  $2 \times 3$  次ラーメモード利用圧電トランス構成:

次に、 $\text{LiNbO}_3$  の長方形板を用い、横に2

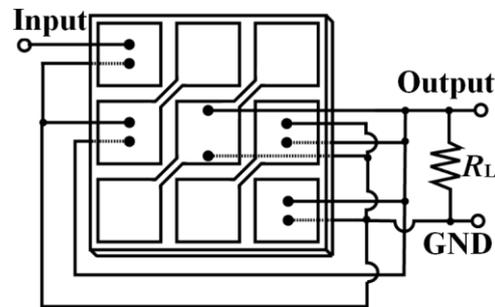


図6. 圧電トランス構成  
( $3 \times 3$  次ラーメモード)

つの共振、縦に3つの共振を励起する  $2 \times 3$  次ラーメモード圧電トランスを新しく考案した。入力部は1枚の電極、出力部は5枚の電極を並列接続した。有限要素法解析の結果、 $R_L = 100 \Omega$  のとき  $\eta > 95\%$ 、 $R_L = 20 \Omega$  のとき  $\eta \approx 85\%$  の高効率が得られ、電圧比0.2の降圧トランスが高効率で実現できることが示された。

⑤ 有限要素法の連成場解析の実施:

電気的な負荷抵抗  $R_L$  を機械的な構造解析ソフトである有限要素法に導入する連成場解析を実際に使えるように工夫した。これに

より、的確な圧電トランスの構造を設計できることになり、有用な開発ツールを開拓した。

以上の成果により、小形・低損失で高効率のACアダプタ対応の圧電トランスの実現に至った。

(2) 圧電トランスのスイッチング励振回路の作製・評価  
(MOSFETによるスイッチング)

① 数10kHz帯における特性：

この周波数帯におけるスイッチング回路の効率特性を詳しく調べた。測定回路を図7に示す。ここで、 $V_{gs1}$ 、 $V_{gs2}$ はスイッチング制御電圧であり、方形パルスである。

図8に  $f=50\text{kHz}$  におけるスイッチング回路単独での効率測定結果を示す。この周波数帯域では97%程度の高効率で使用できるこ

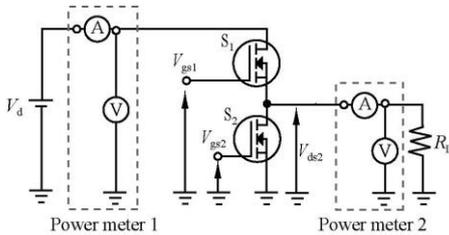


図7. スwitching回路  
効率の測定回路

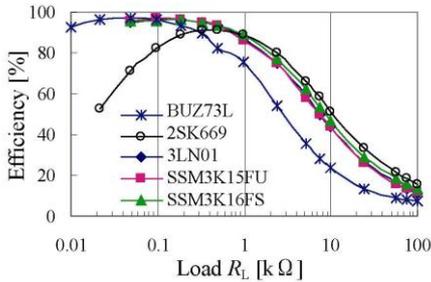


図8. スwitching回路効率の測定結果  
( $V_d=5\text{V}$ ,  $V_{gs}=10\text{V}$ ,  $D=0.43$ ,  $f=50\text{kHz}$ )

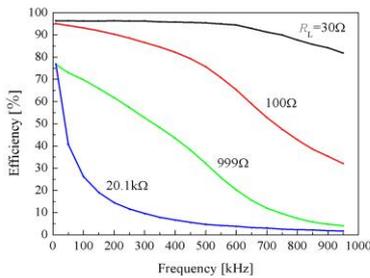


図9. MOSFET スwitching  
効率周波数特性

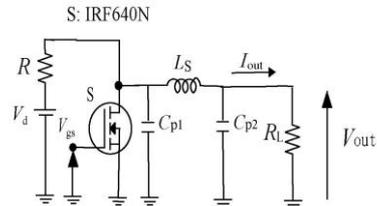
とが明らかとなった。

② 数100kHz帯における特性：

図7のスイッチング回路のうち、MOSFETの $S_2$ だけを用いて、スイッチング効率の周波数ならびに負荷抵抗 $R_L$ による影響を詳しく調べた。その結果を、図9に示す。これより、MOSFETの電極間容量により、 $R_L$ が大きく、周波数が高いほど効率が急激に低下することが明らかになった。

③ インダクタンス挿入による高周波帯における効率の改善：

高周波ではMOSFETの電極間容量による効率の低下が著しいことがわかった。そこで、図10のようにMOSFETと出力負荷抵抗 $R_L$ の間にインダクタンス $L_S$ を挿入して効率の改善を計った。そのときの測定結果を図11に示す。この結果、MOSFETの電極間容量 $C_{p1}$ と $L_S$ ならびに出力段並列容量 $C_{p2}$ との間で共振が起き、スイッチング駆動波形は方形波( $5\text{V}_{P-P}$ )にも拘らず容量 $C_{p2}$ の両端の電圧の波形は正弦波となって、しかも振幅が電圧増幅された正弦波となっている。このた



( $V_d=5\text{V}$ ,  $V_{gs}=10\text{V}_{pp}$ ,  $R_L=10\text{k}\Omega$ ,  $L_S=4.76\text{mH}$ ,  $C_{p1}=675\text{pF}$ ,  $C_{p2}=685\text{pF}$ )

図10. 高周波におけるスitching  
効率測定回路

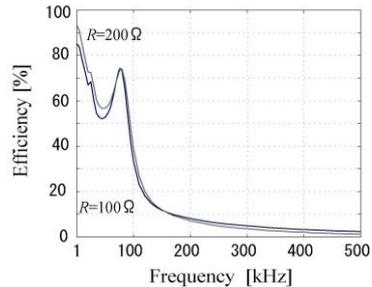


図11. 高周波におけるスitching  
効率測定結果

め、図10の回路全体の効率は、図11の測定結果に示してあるように、共振周波数 $\approx 140\text{kHz}$ において大きく向上していることがわかる。今後は $L_S$ の最適条件を探索して、高

周波においても 90%程度の効率を実現できるようにしていけば、圧電トランスの駆動回路に利用できることが明らかとなった。

### (3) 圧電トランスのパワー試験計測システム

#### ①アナログ方式計測システムの最適化：

圧電材料はハイパワーで励振すると非線形性が現れ、特性試験を行うことが難しい。圧電単結晶材料を用いた圧電トランスにおいても同様で、安定的に測定できる計測シ

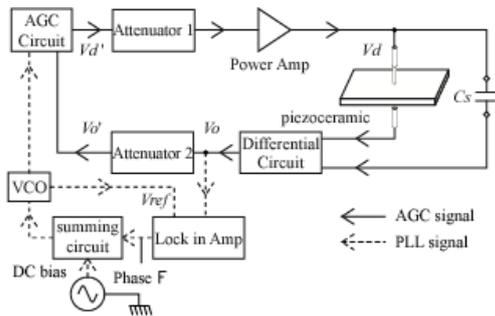
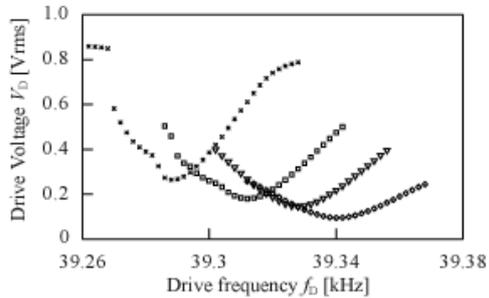
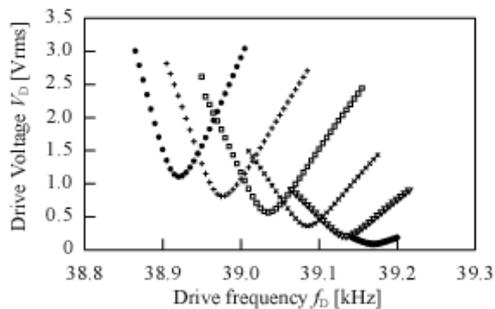


図 12. 圧電トランスパワー特性の自動計測回路



(a) 改良前



(b) 改良後

図 13. 一定電流制御後の駆動電圧の共振曲線

テムが切望されていた。研究代表者は、これまでこのシステムの実現と最適化の研究を重ねてきて、図 12 のシステムの実現に至っ

た。このシステムは、図 12 に示してあるように、安定制御を行うために圧電トランスの振動振幅に比例する圧電トランス電流一定制御を行うもので、その主要部である AGC 回路に内蔵されているシステムを改良し、最適化をはかった。そのときの改良前と改良後の圧電トランス駆動電圧の共振特性を図 13(a),(b)に示す。これらの図からわかるように、パワー（駆動電圧）が大きくなっていくと共振周波数が低下、移動する。従って、図 12 では VCO（電圧制御方式発振回路）を経由する破線の制御経路により、共振点自動追尾動作も実現し、圧電トランスパワー試験の完全自動化に近いシステムを構築して、非常に有用な成果をあげた。

#### ②ソフトウェア方式計測システムの実現：

アナログ方式に比べ、更なる汎用性のあるソフトウェア方式によるパワー特性計測システムの実現に成功した。この方式はコンピュータで制御されるモジュール型の発振器、デジタイザならびに D/A 変換器を中心としたシステムであり、取得したデータを解析し、ソフトウェアにより圧電材料の非線形性を制御して安定的にパワー特性を測定できるシステムである。これは、AC アダプタ用圧電トランスに向けて大量のパワー試験を行う際に非常に有効なシステムとなる。

以上、得られた研究成果の概略を整理して示した。

### 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 7 件)

① Hideki Tamura, Keita Itoh, Yutaka Doshida, Yasuhiro Yamayoshi and Seiji Hirose; Software-Controlled Measurement System for Large Vibrational Amplitude Piezoelectric Resonator Using Continuous Driving Method with Numerical Equivalent Model, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, No.50, 2011, pp.07HC11-1-7, DOI: 10.1143/JJAP.50.07HC11

② Yutaka Doshida, Hiroyuki Shimizu, Youichi Mizuno, Keita Itoh, Seiji Hirose and Hideki Tamura; Nonlinear Behavior and High-Power Properties of (Bi,Na,Ba)TiO<sub>3</sub> and (Sr,Ca)<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> Piezoelectric Ceramics, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, No.50, 2011, pp.09ND06-1-6, DOI: 10.1143/JJAP.50.09ND06

〔学会発表〕(計 16 件)

- ①松永直樹, 山吉康弘, 広瀬精二; 2 次ラーメ  
モードを利用する単結晶  $\text{LiNbO}_3$  圧電ト  
ランスの支持とスプリアス振動に関する  
研究, 日本音響学会研究発表会, 2-P-12,  
2012.3.14, pp.1359-1362.  
(横浜市: 神奈川大学(横浜キャンパス))
- ②飯島智之, 広瀬精二, 山吉康弘; 圧電トラ  
ンスのスイッチング励振回路の動作条件  
に関する基礎的検討, 日本音響学会研究  
発表会, 1-P-4, 2010.9.14, pp.1221-1224.  
(大阪府吹田市: 関西大学)
- ③渡辺徹也, 広瀬精二, 山吉康弘, 田村英樹;  
圧電振動子の大幅励振特性測定システ  
ムにおける安定性向上についての検討,  
日本音響学会研究発表会, 1-Q-5,  
2009.9.15, pp.1251-1254.  
(郡山市: 日本大学工学部)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

広瀬 精二 (HIROSE SEIJI)  
山形大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 70007201

### (2) 研究分担者

田村 英樹 (TAMURA HIDEKI)  
東北工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 90396581  
青柳 学 (AOYAGI MANABU)  
室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 80231786  
高野 剛浩 (TAKANO TAKEHIRO)  
東北工業大学・工学部・名誉教授  
研究者番号: 50085411

### (3) 連携研究者

なし