

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420239

研究課題名(和文) 圧電単結晶の共振を利用する超小形ACアダプタ実用化のための高効率駆動回路の実現

研究課題名(英文) High-efficiency driving circuit to realize small AC-DC converter by using mechanical resonance of piezoelectric single crystal

研究代表者

広瀬 精二 (HIROSE, SEIJI)

山形大学・理工学研究科・名誉教授

研究者番号：70007201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：LiNbO<sub>3</sub>圧電トランスを用いて小形・高効率のACアダプタ実現を目指し、その駆動回路および周辺回路の検討を行った。スイッチング素子MOSFETは、その端子間容量のために圧電トランスを駆動する数百kHzにおいて効率が極端に劣化する。本研究では、原理的に端子間容量の影響が発生しにくいスイッチング駆動回路を考案し、実証試験を行って有効な成果が得られた。また、さらに効率改善や小形化をはかるために周辺回路の精査、改良を行った。

研究成果の概要(英文)：Driving circuit and other additional circuits of LiNbO<sub>3</sub> piezoelectric transformer have been studied for achieving small sized-high efficiency AC-DC power supply. Switching device MOSFET has capacitances between each two electric terminals, where the terminals are Gate, Source and Drain. Because of these capacitances, switching efficiency of MOSFET becomes very low at the frequency of several hundred kHz for driving piezoelectric transformer. In this study, switching circuit which is little influenced by these capacitances has been invented. By the experiment, it has been shown that newly developed switching circuit gives useful results. To realize further improvement on efficiency and miniaturization of piezoelectric transformer application circuit, the effect of additional inductance and charging battery as smoothing device of rectifier circuit have been examined, and some improvements have been achieved.

研究分野：超音波エレクトロニクス

キーワード：ACアダプタ 圧電トランス 圧電単結晶 スwitching 駆動回路 高効率

### 1. 研究開始当初の背景

現在ノートパソコンなどに使われている AC アダプタは、大きくて重く電力効率が悪い、など課題が多く、電源を含めた真の意味でのモバイル機器の小形軽量化への障害になっている。申請代表者はこれまでに、電磁トランス式の AC アダプタに代えて圧電単結晶チップの機械的共振を介して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ことによって、1/5 程度に格段に小形軽量化、98%以上の高効率・省エネ化を目指して精力的に研究を行ってきた。この結果、SAW フィルタとして大量に流通している圧電単結晶 LiNbO<sub>3</sub> の 128° 回転 Y 板を用いて、15mm×15mm×0.4mm という小さな正方形板チップで理論上 98%以上[文献①]の高効率の AC アダプタ用ステップダウントランスを実現できることを見出した。同時に、圧電トランス方式では機械共振振動を用いているので、スイッチング回路などの駆動・制御回路は電磁式とは大きく異なり、圧電トランス方式に適した新しいスイッチング駆動回路の考案が必要であることが判明した。

### 2. 研究の目的

本研究では、超小形・軽量、高効率の AC アダプタ実現に向けて、残された最後の課題である圧電トランス方式 AC アダプタの高速高効率スイッチング駆動・制御回路の実現に向けた研究を行う。LiNbO<sub>3</sub> を用いた圧電トランスを駆動する数百 kHz の周波数では、MOSFET などのスイッチングデバイスの性能劣化が生じ駆動回路におけるスイッチング損失が増大してしまうので、LiNbO<sub>3</sub> 圧電トランスの高効率性能を十分に生かすことができない。本研究では、MOSFET の性能劣化の原因を究明し、その解決策をいくつか提案してスイッチング駆動効率の改善をはかった。

### 3. 研究の方法

これまで、図 1 に示されるような圧電単結

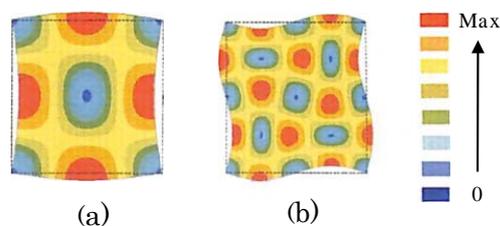


図 1. LiNbO<sub>3</sub> 基板に励振されるラームモード共振  
(a)1×1 モード, (b)2×2 モード共振.

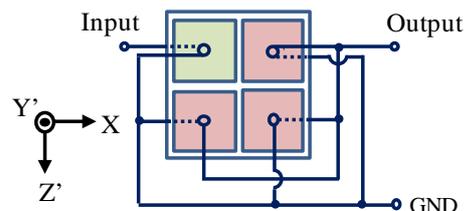


図 2. LiNbO<sub>3</sub> 圧電トランスの構造と電気的結線.

晶 LiNbO<sub>3</sub> に励起されるラームモード高次共振を用いて降圧型圧電トランスの研究を行ってきた[文献①]が、小形化などの点から圧電トランスの寸法が制限され、その結果、利用共振周波数は数百 kHz に至る。圧電トランスの駆動には MOSFET によるスイッチング回路を用いるが、ゲート-ソース間に存在する数百 pF の端子間容量によってドライブ波形が崩れ、結果として電力効率低下に至る。本報告では、駆動波形の劣化を最小限に抑えることが可能な FET ドライブ回路について検討を行った。また、FET との比較のためにパワートランジスタを用いた駆動回路についての検討を行い、さらに周辺回路である最終段・整流回路についても検討を加えた。

具体的には、以下の各項目について検討を行う。すなわち、(1)圧電トランス励振用スイッチングパワーMOSFET の選定、(2)外部挿入チョークコイルによる効率改善、(3)パワーMOSFET のスイッチング駆動波形操作による効率改善(①スイッチング駆動源の内部インピーダンス低減による方法、②MOSFET 端子間容量キャンセルによる方法)、(4)パワートランジスタによる効率改善、(5)出力段整流平滑コンデンサに代わって充電電池を用い

た場合の効果，である。

LiNbO<sub>3</sub> 圧電トランスの構造と特長をさらに詳しく述べると以下ようになる。すなわち，図 1 は LiNbO<sub>3</sub> の 128° 回転 Y 板に励起されるラーモード共振の，(a) 1×1 次共振，(b) 2×2 次共振の振動パターンである。(a) の中心部は変位と回転が 0 であり，4 隅は変位 0 であるが回転は存在する。(b) を 4 分割したそれぞれの領域では，(a) と同じパターンが，正・逆に位相を違えて現れている。4 分割の各領域の中心部は変位と回転が 0 の振動節点となっており，支持とリード線取り出しが 4ヶ所のできるので(a)のパターンより格段に有利である。従って，電圧変換の圧電トランスとして(b)のパターンを用いている。

図 2 は，電極を分割して，入力部は電極の 1 面，出力部は電極の 3 面を使用して電圧降下型の圧電トランスとしたもので，電圧比 1 : (1/3) となる。外形寸法は 15mm×15mm×0.4mm であり，共振周波数は， $f_r = 344.8\text{kHz}$ ，入力端子から測定（出力端短絡）した共振尖鋭度は， $Q = 8,400$  であった。

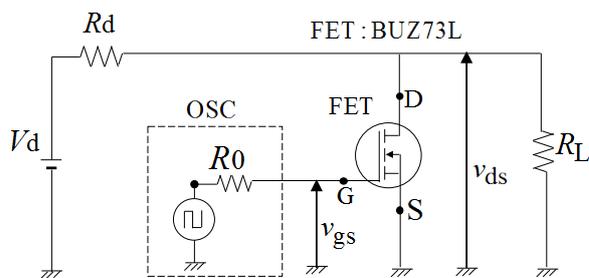
#### 4. 研究成果

##### (1) 圧電トランス励振用スイッチングパワー MOSFET の選定

MOSFET には端子間容量があり，また ON 抵抗もスイッチング性能に大きく影響を及ぼす。ここでは，端子間容量や ON 抵抗を勘案して 6 種類の MOSFET を準備して，スイッチング効率の比較を行った。測定回路を図 3 に示す。OSC はスイッチング駆動源の矩形波発生回路である。

スイッチング駆動時の電力効率の結果から，圧電トランス駆動に使用する 350kHz 近傍で効率が相対的に最も高く，また同等の効率である FET よりも入力容量が小さい BUZ73L (SIEMENS 社製) を使用することに決定した。

##### (2) 挿入チョークコイル $L_s$ による効率改善



( $R_0=50\ \Omega$ ,  $R_d=R_L=200\ \Omega$ )

図 3. MOSFET のスイッチング特性測定回路。

図 3 の出力抵抗  $R_L$  に並列に容量  $C_a$  を接続する。この  $C_a$  の値は，LiNbO<sub>3</sub> 圧電トランスの入力部静電容量の値を中心に数種の値を用いている。この  $C_a$  とともに直列共振回路を形成するように， $R_L$  と  $C_a$  の並列回路と FET ドレイン端子との間にチョークコイル  $L_s$  を挿入する。このようにして電力効率 ( $=P_2/P_1$ ) を測定した結果を図 4 に示す。図中の  $P_1$  は図 3 において DC 電源から出力される電力であり， $P_2$  は出力抵抗  $R_L$  に現れる出力電力である。図 4 によると， $L_s$  と  $C_a$  による共振周波数において効率が最大となることがわかる。この結果を応用して，出力抵抗  $R_L$  に替えて LiNbO<sub>3</sub> 圧電トランスに置き換えた場合には， $L_s$  の調整によって，LiNbO<sub>3</sub> 圧電トランスの本来の高効率特性を引き出せることがわかった。

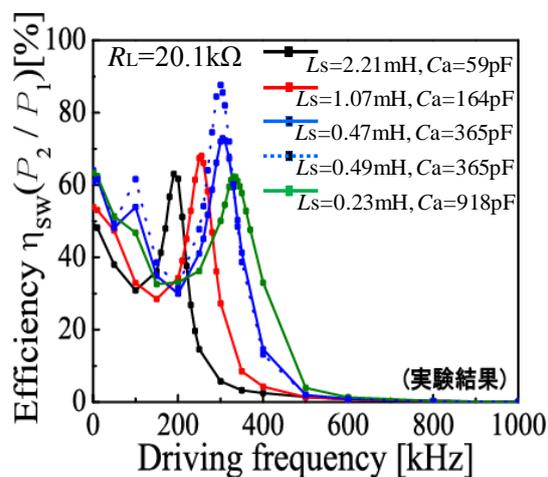
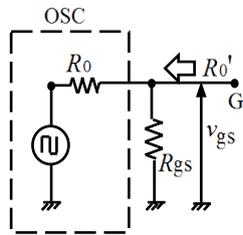


図 4. 外部挿入インダクタンス  $L_s$  による効率向上の効果

(3) パワーMOSFET のスイッチング駆動波形操作による効率改善

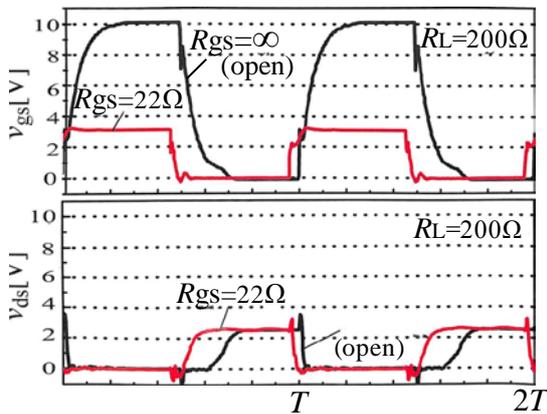
①スイッチング駆動源の内部インピーダンス低減による方法

データ表によると、BUZ73L(SIEMENS 社製)はオン抵抗  $0.4\Omega$ , ゲート閾値電圧  $1.2\sim 2.0V$ , ゲートソース間容量  $C_{gs}=570pF$ , ゲートドレイン間容量  $C_{gd}=60pF$ , ドレインソース間容量  $C_{ds}=60pF$  である。特にゲートソース間容量  $C_{gs}$  がゲートドライブ波形である矩形波の劣化に大きく影響する。閾値電圧を確保しながらこのゲートドライブ波形の劣化を改善する方法について検討する。



(  $R_0=50\Omega$ ,  $R_{gs}=22\Omega$ ,  $R_0'=15\Omega$  )

図 5. 実効的な内部抵抗を低減できる FET スwitching 駆動源



(  $T=2.86\mu sec$ , Frequency  $f=350kHz$  )

図 6. 改良されたスイッチング駆動源(図 5)を用いて測定された  $v_{gs}$ ,  $v_{ds}$  の波形

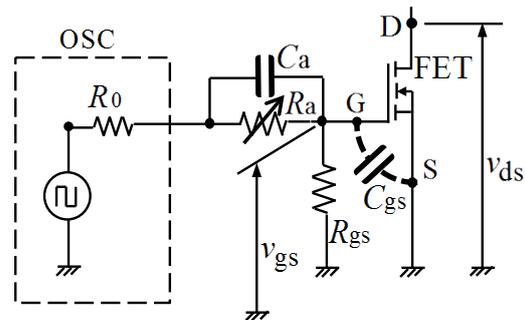
図 3 の測定回路において、破線の四角で囲った矩形波発生回路に図 5 に示すような改造を加える。圧電トランスを駆動する場合には、図 3 の負荷抵抗  $R_L$  の部分にチョークコ

イルを介して圧電トランスを接続する。

すなわち、図 5 は、図 3 の矩形波発生回路の出力端に並列に抵抗  $R_{gs}$  (低抵抗) を挿入し、実効的な内部抵抗を  $R_0=50\Omega$  から  $R_0'=15\Omega$  に低減したものである。このときの  $v_{gs}$ ,  $v_{ds}$  の波形を図 6 に示す。両波形とも  $R_{gs}$  を付加しない場合 (open ( $R_{gs}=\infty$ )) に比べ、矩形波の劣化が改善されている。その結果としてスイッチング回路の効率も改善されることが示された。しかし、この回路では、 $R_0$  と  $R_{gs}$  に流れる電流が大きくなり、これらの抵抗での電力消費が大きくなる欠点があった。

②MOSFET 端子間容量キャンセルによる方法

図 7 は、駆動電圧を、 $R_a$  と  $C_a$  から成る回路と、 $R_{gs}$  と  $C_{gs}$  から成る回路で分圧したもので、 $R_a$  の調整によって矩形波から崩れた波形を修復するものである。 $C_{gs}$  の実際の値は不明であるから、波形を観測しながら  $R_a$  を調整していく。 $R_{gs}=119k\Omega$  と高抵抗であり、調整した結果の  $R_a=24.6k\Omega$  も高抵抗となるので、 $R_0$  も含めこれらの抵抗を流れる電流は微小となり、ドライブ回路における電力消費は無視できるほど小さくなる。



(  $R_0=50\Omega$ ,  $R_{gs}=119k\Omega$ ,  $R_a=24.6k\Omega$ ,  $C_a=578pF$  )

図 7. 抵抗とコンデンサの並列回路による分圧回路を施したスイッチング駆動源

$v_{gs}$ ,  $v_{ds}$  の実験結果を図 8, 図 9 に示す。図 8 は、改造を加えない場合の波形で、 $v_{gs}$ ,  $v_{ds}$  のいずれも矩形波から大きく崩れている。これに対し、図 9 は分圧回路を用いた場合の結果であり、 $v_{gs}$ ,  $v_{ds}$  共に矩形波が再現されていることがわかる。

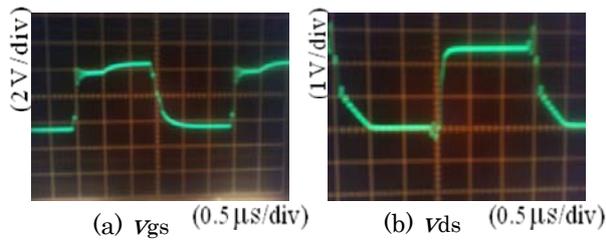


図 8. スイッチング回路に改良を加える前の  $v_{gs}$  and  $v_{ds}$  の波形( $f=350\text{kHz}$ )

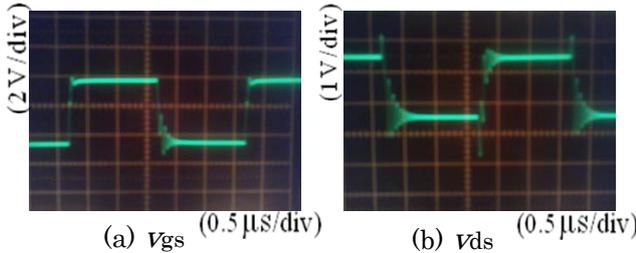


図 9. スイッチング回路に図 7 の改良を加えた場合の  $v_{gs}$  and  $v_{ds}$  の波形( $f=350\text{kHz}$ )

以上のことから、この分圧回路を用いた FET ゲート入力波形改善と挿入インダクタンス  $L_s$  の組合せによって、LiNbO<sub>3</sub> 圧電トランスの駆動回路の高効率化が計られることが明らかとなった。

#### (4) パワートランジスタによる効率改善

MOSFET はスイッチング特性が優れているが、端子間容量が大きく、このため高周波域での性能低下を招く欠点があった。これに対して、パワートランジスタを用いた場合にはどの程度のスイッチング性能が得られるのか、比較のために検討してみた。

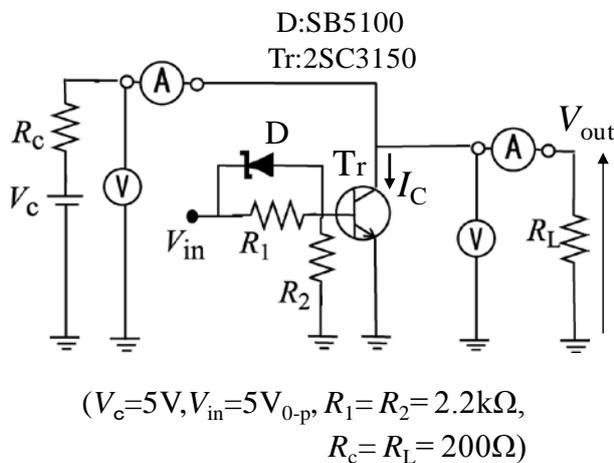


図 10. パワートランジスタとショットキーダイオードによるスイッチング回路

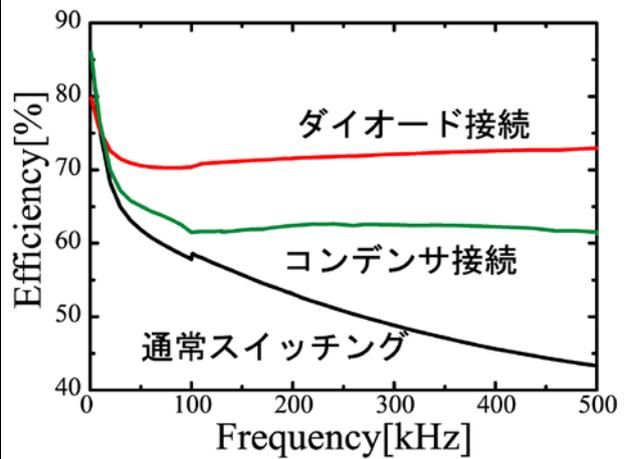


図 11. パワートランジスタを用いた回路によるスイッチング効率

図 10 にパワートランジスタを用いたスイッチング回路の測定回路を示す。スピードアップのためにツェナーダイオードを接続すると、図 11 に示したように、ツェナーダイオードを接続しない通常スイッチングの結果に比べ、大幅に効率が向上し、また 500kHz の高周波数までほぼ不変であることがわかる。

図 10 の回路の  $R_L$  に代えて圧電トランスを接続し、さらにインダクタンス  $L_s$  を挿入すると図 12 のような高効率の結果が得られることがわかった。この場合には、圧電トランスサンプルの準備の都合から 50kHz 共振の圧電トランスを用いたが、図 11 の広帯域特性から考えると図 2 のような 350kHz 共振の圧電

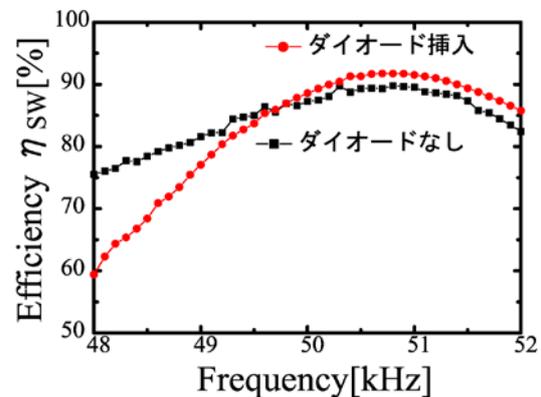


図 12. パワートランジスタとショットキーダイオード及び挿入インダクタンスを併用した圧電トランスのスイッチング効率

トランスに対しても同様に高効率スイッチングが期待できる。

(5) 出力段整流平滑コンデンサに代わって充電電池を用いた場合の効果

AC アダプタであるから出力電圧は直流電圧であるので、高周波出力を整流・平滑する必要がある。平滑回路にはコンデンサを用いるが、このコンデンサの容量は比較的大きいものを必要とするので、コンデンサの構造的な大きさも比較的大きいものになる。一方、モバイル系の機器には充電電池を用いている。この充電電池に平滑コンデンサの役割を兼用できるようにすれば小型化に有利である。この件について実験的に検討したので、以下にその方法と結果について述べる。

整流用ダイオードに、10kHz および 100kHz で 3Vp-p の正弦波電圧を印加する。また、ダイオードの出力段に出力抵抗  $R_L=1k\Omega$  と平滑コンデンサ  $C_S=1\mu F$  を並列に接続する。この結果、10kHz では出力電圧にリップルが大きく現れているが、100kHz ではリップルが抑え込まれており、良好な整流出力となっている。

これに対して、平滑コンデンサに代えて充電電池を接続した場合には、10kHz および 100kHz の正弦波入力電圧に対して、平滑コンデンサを用いた場合に比べていずれもリップル波形が小さい値に抑え込まれており、平滑回路の機能が十分保有されていると見なせる。このことは、充電電池が大きな容量を持ったコンデンサと同じ働きをすることによると考えられる。従って、比較的大きな部品となる平滑コンデンサを削減できることが示された。

<引用文献>

①樋口, 広瀬, 山吉, 田村; 日本音響学会研究発表会, 1-Q-2 (2009. 9).

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

①山吉 康弘, 広瀬 精二; 二つの正方形板屈曲振動子を用いた非接触型超音波モータにおけるエアギャップの音場特性の解析, 日本音響学会誌, 査読有, Vol.70, No.11, 2014, pp.589-590.

[学会発表] (計 9 件)

①広瀬 精二; 圧電単結晶  $LiNbO_3$  の高次ラーメモード共振を利用する圧電トランスの励振回路に関する検討, 日本音響学会講演発表会, 桐蔭横浜大学 (神奈川県・横浜市), 1-Q-17, 2016. 3. 9, pp. 1247-1248.

②高谷 峻弘, 田村 英樹, 高野 剛浩; リニア超音波モータのバースト波駆動による基本特性の実験評価, 日本音響学会講演発表会, 桐蔭横浜大学 (神奈川県・横浜市), 1-Q-9, 2016. 3. 9, pp. 1229-1232.

③大島 卓也, 渡邊 綾斗, 山吉 康弘, 広瀬 精二; 圧電単結晶  $LiNbO_3$  の  $2\times 3$  次・ $3\times 2$  次ラーメモード共振を用いた圧電トランス, 日本音響学会講演発表会, 豊橋技術科学大学 (愛知県・豊橋市), 2-Q-4, 2013. 9. 26, pp. 1235-1238.

④渡邊 綾斗, 大島 卓也, 山吉 康弘, 広瀬 精二; 圧電トランスの励振に適した MOSFET スイッチング回路の検討, 日本音響学会講演発表会, 豊橋技術科学大学 (愛知県・豊橋市), 2-Q-5, 2013. 9. 26, pp. 1239-1242.

## 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・名誉教授  
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