

## 可変容量ダイオードを用いたチョッパ回路における定電圧特性

## Constant-voltage Characteristic of Chopper Circuit using Variable-Capacitance Diode

濱崎 真一

福島工業高等専門学校電気電子システム工学科

HAMAZAKI SinIchi

National Institute of Technology, Fukushima College, Department of Electrical and Electronic System Engineering

(2021年8月30日受理)

The boost chopper circuit is one of the circuits that amplify a small voltage. The main factor in boosting the voltage of the chopper circuit is the work of the inductor, while the capacitor is responsible for the constant voltage property. In this experiment, the capacitor was replaced with a variable-capacitance diode to check the effect of boosting the voltage. The results with the variable capacitance diode showed a smaller gain than the capacitor, but the gain was stable over a wide range of frequency variation. However, the output of the boost chopper circuit with variable-capacity diodes is controlled by the Zener voltage of the diodes.

**Key words:** Chopper Circuit, Variable-capacitance Diode, Constant-voltage, Energy Harvest, Charge circuit

## 1. はじめに

自然界に存在する光や振動、熱や風の流れなどの微小な変化も、様々なデバイスを用いることで電圧源になる可能性がある。しかしこれらの微小変動によって得られる電圧は非常に小さく利用することが難しく、実際の場合はほとんどが利用できず無価値である。これらを現実的に有効活用するには、二次電池に充電し利用することが考えられるが、微小電圧が電池に充電可能な電圧を越えることはなく、また概ね電圧源の内部抵抗が大きいことが予想される。そこで様々な方法でこの微小な電圧を昇圧することにより蓄電を試みる必要があると考えられる。昇圧チョッパ回路はそのような昇圧回路の一つであり、昨今でも様々な場面<sup>(1)~(6)</sup>で応用活用されている。

Fig.1(a)は、昇圧チョッパ回路の一般的な回路図である。この昇圧回路における主たる昇圧の要因は、コイル $L$ に流れるスイッチ部分で制御された時間変位を持つ電流の変化によるが、この回路におけるコンデンサの役割は平滑、リップル電圧制御を担っている。つまり、コンデンサはこの回路の出力を安定させる役割を担っていることになる。

本論文ではこの昇圧チョッパ回路において、Fig.1(b)の様に、スイッチ制御にトランジスタスイッ

チを用いて行い、さらにコンデンサを電圧により容量と抵抗を変動させる可変容量ダイオードに置き換え、その周波数特性ならびに、この回路を用いた充電の様子を測定する。可変容量ダイオードは、PN接合部の空乏層の広がりにより容量が変化するFM変調、チューナー等に利用される電子部品であり、逆方向の電圧増加によりその静電容量が減少する。この様な可変容量ダイオードを用いて、昇圧チョッパ回路の昇圧度変化ならびに、その結果として得ら

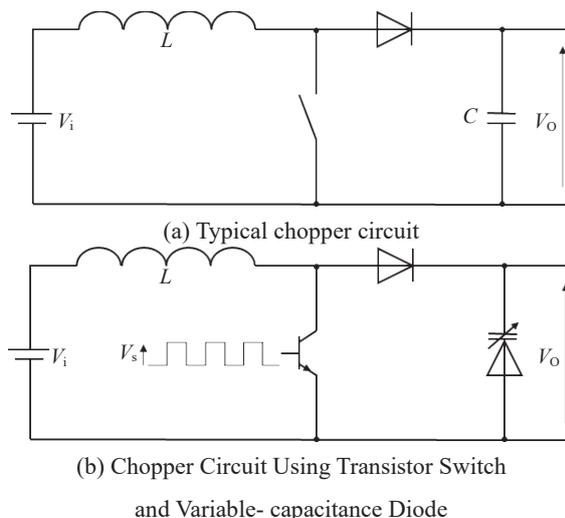


Fig. 1. Circuit diagram of boost chopper circuit

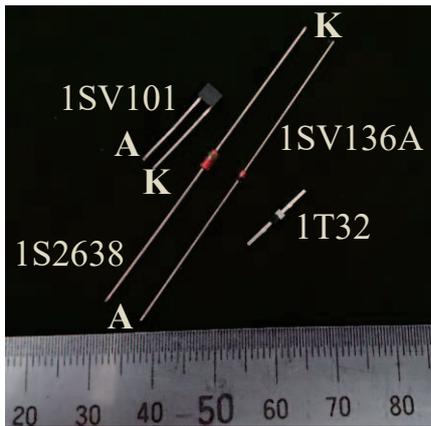


Fig. 2 Photo of variable-capacitance diodes

れる充電回路の効率の変化を検証する。

## 2. チョップア昇圧回路の周波数特性

### 2.1 コンデンサとダイオードの容量による対比

Fig.2 は、今回実験に用いた可変容量ダイオードの外観である。今回使用したものは、1SV101(10～50pF:東芝)、1S2638(5～20pF:日立)、1SV136A(2～20pF:日立)、1T32(2～20pF:Sony)の5点である。また、比較として今回の可変容量ダイオードと同程度の静電容量を持つセラミックコンデンサについても周波数特性を測定する。なお、コイルには 100 $\mu$ H、1mH、100mH の3種類を用いたが、後述の結果より、大方はコイルの周波数特性に依存した結果がどの測定でも確認できたことから、本報告では 100 $\mu$ H の結果のみで評価する。スイッチに用いたトランジスタは、本実験の周波数帯で安定的な動作を示す 2SC1815 ならびに 2SC2785 を使い、スイッチ用に利用する電圧信号は、ファンクションジェネレータ (DF1906:NF) によって成型された Fig1(b) に示すような 10Hz～2MHz の矩形波信号である。

Fig.3 は、入力電圧  $V_i$  を 1V とし、スイッチ用矩形波の振幅電圧  $V_s$  を +2.5V とした時のコンデンサならびに可変容量ダイオードの昇圧度の周波数特性を示したものである。図中白抜きのはコンデンサ、黒塗りのものは可変容量ダイオードの結果であり、 $V_o$  を開放して測定している。また、図上部のグラフは、この実験で使用した 100 $\mu$ H のコイルの端子間のインダクタンスならびにインピーダンスの周波数特性を示している。

図が示すようにチョップ回路の昇圧度はコイル

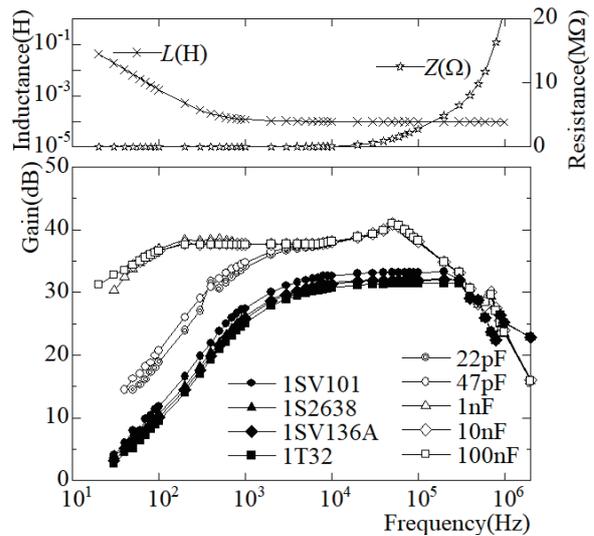
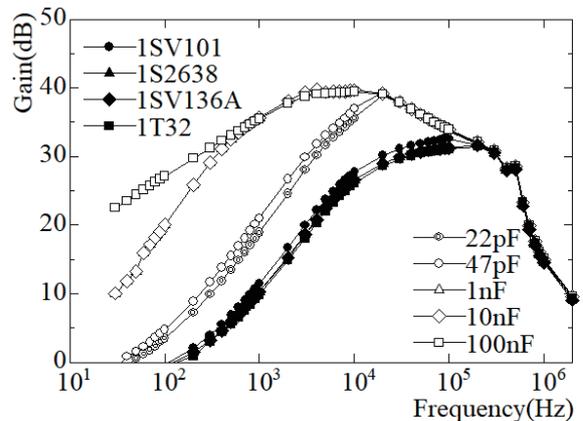
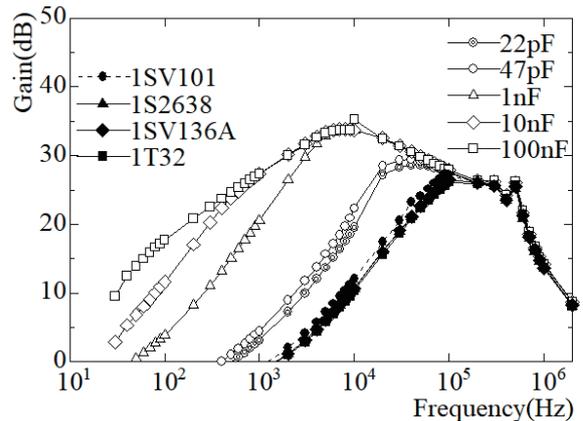


Fig. 3. Frequency dependence of gain of chopper



(a) Frequency dependence of gain at 1M $\Omega$



(b) Frequency dependence of gain at 10k $\Omega$

Fig. 4. Load characteristics of the gain of a chopper circuit

の自己インダクタンスによるところが大きく、コンデンサの容量の変化で利得の最大値の値は変わら

ず、いずれも 40dB(100 倍)程度である。唯一低域周波数帯での利得増加の様子で個体差が確認できる。また低域ならびに高域の利得の減衰は、上部のコイル特性と比較して、インダクタンスの安定する周波数、インピーダンスの急激な増加を示す周波数に影響を受けているとわかる。これに対し、可変容量ダイオードにおいては、その利得はコンデンサに比較して最大 30dB(35 倍)程度と減少する様子がみられるが、大きな個体差がなく広い周波数帯域で利得が安定した様子が得られている。

ただし、この昇圧チョップパ回路は、コイルに流れる電流量が利得に影響を与えるため、出力に接続する負荷の大きさが大きく特性を変化させる。Fig.3の結果の回路の出力に負荷抵抗 1M $\Omega$ 、10k $\Omega$ を接続したときの利得の様子を Fig.4 に示す。この図より、負荷が小さくなるにつれ、安定して利用できる周波数帯が狭くなる傾向がみられる。これに関しては、回路全体の利得は前述のようにインダクタンスによる影響が大きく、その値を変化させることと、周波数に対するインピーダンス調整を行うことにより、安定した利得の周波数帯域を調整することが可能である。

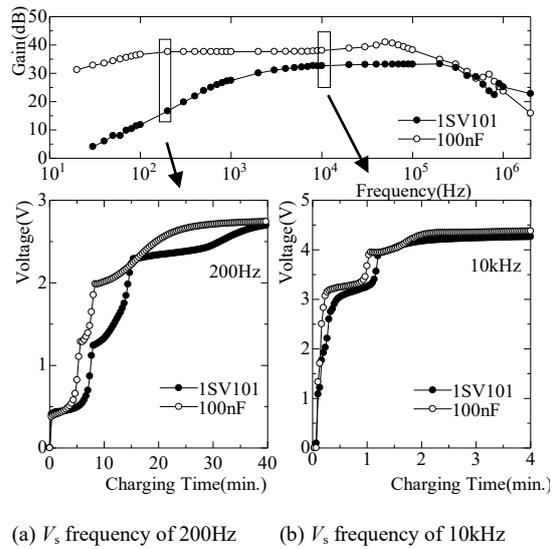
## 2.2 チョップパ昇圧回路による充電特性

入力電圧  $V_i$  を 1V とし、スイッチ用矩形波の振幅電圧  $V_s$  を +2.5V とした Fig.3 の結果の条件下で、スイッチ用の電圧の周波数を変えて、コンデンサ部に 1SV101 とコンデンサ 100nF を用いて二次電池への充電を試みる。今回充電に用いた電池はニッケル水素電池で、1セル 1.2V が 3 つ直列に接続された小容量(公称値出力 3.6V、80mAh、無負荷時最大 4.5V まで充電可)のものを用いた。Fig.5 にその結果を示す。

この図は、 $V_s$  の周波数を、負荷のインピーダンスの大きさが利得の変化が顕著な 200Hz(Fig.3、Fig.4 参照)と、その変化に対してある程度一定の利得が得られる 10kHz の 2 つの周波数時の充電の様子であり、二次電池の端子間電圧の変化も示したものである。それぞれの 3 段階の階段状の充電の様子は、3 つセルを直結させた充電電池の構造による。

Fig.5(a)の 200Hz 時の結果においては、40 分ほどの時間を経て、可変用ダイオード 1SV101、コンデンサ共に 2.7V まで充電されている。これに対し Fig.5(b)の 10kHz 時では、いずれの素子でも 2 分程度で、4.5V まで充電されている。200Hz 時の無負荷時の利得は、100nF のコンデンサにくらべ、1SV101

は 25dB ほど小さいが、同程度に充電がされている様子が見られている。Fig.5 における上部の無負荷時の利得のグラフにおいて、特に 100 nF のコンデンサの利得は 200Hz と 10kHz では、さほど明確な差がないように見えるが、実際の充電過程は充電電圧、充電時間どちらの観点でも大きく異なる。これは、二次電池の充電開始時のインピーダンスはあまり高くないことから、Fig.4 の様な電圧降下の効果が働き、低周波では高い利得が得られないことに要因がある。



(a)  $V_s$  frequency of 200Hz (b)  $V_s$  frequency of 10kHz  
**Fig. 5. Charging process of secondary battery by Boost chopper circuit**

## 3. 可変容量ダイオードによる定電圧化(定利得化)

ここまで周波数変化に対して、コンデンサ、可変容量ダイオードの昇圧度の特性を示してきたが、改めて周波数を固定の上で、入力電圧  $V_i$  の変化、スイッチ用矩形波電圧  $V_s$  の振幅の変化、チョップパ回路の昇圧度制御で重要な矩形波  $V_s$  の On/Off の Duty 比の変化に対して、特に可変容量ダイオードによる昇圧にどのような影響を与えるか評価する。なお、 $V_s$  の周波数は、出力負荷の影響を受けにくい 50kHz において行った。(Fig.3、Fig4 参照)

### 3.1 入力電圧 $V_i$ の変化による出力特性

Fig.6 は、前述の実験同様コイル  $L$  を 100 $\mu$ H とし、スイッチ用矩形波の振幅電圧  $V_s$  を +2.5V、50kHz に固定して、入力電圧  $V_i$  を変化させた際の出力電圧  $V_o$  の様子を示したものである。

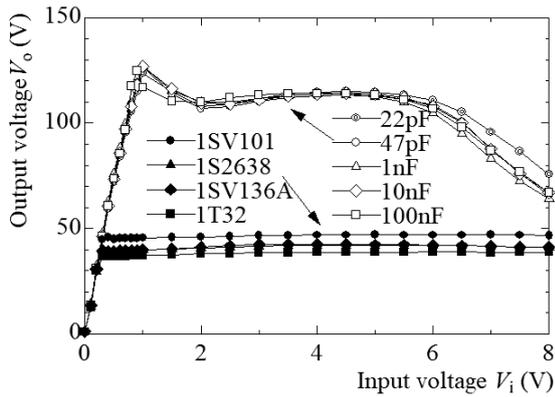


Fig. 6. Output voltage characteristics with input voltage

コンデンサの結果では、いずれのコンデンサにおいても入力電圧  $V_i$  の増加と共に、直線的に最大出力が得られる  $V_i=1V$  まで出力電圧  $V_o$  が増す。その後一定の出力を保ったのち低下する様子がみられている。コンデンサは前述したように平滑、リップル電圧制御を担っているだけであるため明確な個体差が見られなかったが、より大きなコンデンサを用いた場合、コンデンサにおける充電時間の関係から、出力は容量の大きさに応じて低下する。今回の実験でも一番大きな  $100nF$  のコンデンサにおいてわずかに最高電圧が小さくなっている理由は、これが原因である。

さらに、入力電圧が  $5V$  よりの増加した際に出力電圧の低下がみられているが、これはチョップ昇圧回路においては入力電圧  $V_i$  と出力電圧  $V_o$  の差が、回路全体、特にコイル  $L$  に流れる電流値と昇圧率に影響を与えるため、この入出力差が縮まったことに原因がある。

これに対し可変容量ダイオードにおいては、 $V_i=300mV$  まで直線的に増加し、以降コンデンサに比べ低い電圧ではあるものの一定の出力電圧  $V_o$  を保つ様子が見られる。さらにコンデンサのような入力電圧上昇に伴う出力電圧の降下は見られていないが、これはダイオードを逆方向に接続した際の降伏電圧(Zener 電圧)を反映したためと考えられる。

また、可変容量ダイオードの出力電圧  $V_o$  が入力電圧の変化により一定になる過程には個体差は見られていないが、一定になる出力電圧の値には多少の差異がある。これも前述通り、それぞれのダイオードの個々の降伏電圧の違いによるものである。

### 3.2 スイッチ用電圧 $V_s$ の振幅変化による出力特性

Fig.7 は、コイル  $L$  を  $100\mu H$  とし、スイッチ用矩形波周波数を  $50kHz$  に固定して、入力電圧  $V_i$  を  $1V$  とした際の  $V_s$  の振幅の変化させた時の出力電圧  $V_o$  の様子を示したものである。この実験の主旨は、スイッチ開閉にトランジスタを用いることにより、回路全体の電流に加算される可能性のあるトランジスタのベース電流が、昇圧そのものに影響を与えているかを確認するためのものである。

図をみてもわかるように、コンデンサ、可変容量ダイオード共に  $V_s$  の振幅が  $0.7V$  以降、急激に出力  $V_o$  を発生させ、 $1V$  を越えた時点から、このスイッチ用電圧  $V_s$  の振幅が増加しても一定の値を示す様子が見られている。ただし、可変容量ダイオードは、やはり降伏電圧による制御がかかり、コンデンサより小さな出力で留まっている。 $V_s=0.7V$  から出力が発生する理由は、単にトランジスタが ON になる立ち上がり電圧の影響による。

この結果は  $V_s$  の振幅の大きさが、昇圧チョップ回路にあまり影響を与えないことを示している。つまりスイッチ開閉に使用する電圧は、昇圧に関与していないことを意味する。一般的なトランジスタによるスイッチ制御であれば、必要とされる開閉用電圧  $V_s$  の大きさは、トランジスタの立ち上がり電圧であるところの  $0.7V$  程度を越えた  $1V$  もあれば十分である。

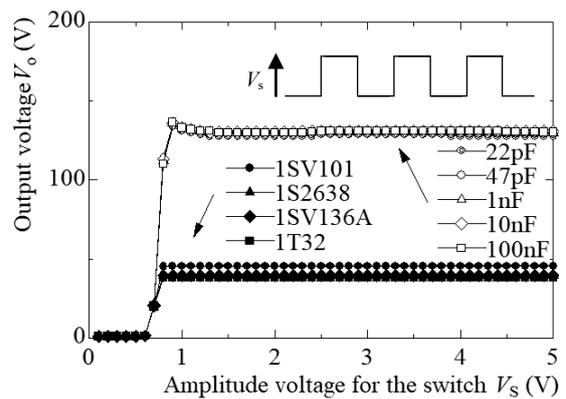


Fig. 7. Output characteristics with amplitude of  $V_s$

### 3.3 スイッチ用電圧 $V_s$ の Duty 比変化による出力特性

昇圧チョップ回路において、スイッチ制御の信号の Duty 比の制御はその昇圧度の制御に直結しており、例えば鉄道における加速減速制御など、様々な場面で応用されている。実際の制御においては、ス

イッチとなる信号の On/Off の比のみならず周波数も変動させることにより、On ならびに Off の時間を状況に合わせて延縮するが、本報告では主旨を明瞭にするため、周波数は固定したうえで Duty 比のみでの評価を行う。

Fig.8 は、コイル  $L$  を  $100\mu\text{H}$  とし、スイッチ用矩形波周波数を  $50\text{kHz}$ 、振幅を  $+2.5\text{V}$  に固定して、入力電圧  $V_i$  を  $1\text{V}$  としたときの実験結果である。 $x=0$  ならびに  $1$  は、常に Off、常に On をそれぞれ意味しており、直流を印可していることになる。そのためコイル  $L$  に流れる電流に変化がなくなるため昇圧が望めなくなる。Fig.8 では、その様子が明確にみられている。

コンデンサの結果については、他の実験同様このオーダーで大きな差異はない。また  $x=0.5(T_{\text{on}}=10\mu\text{s}$ 、 $T_{\text{off}}=10\mu\text{s})$  まで、出力  $V_o$  は単純増加し、その後減少する傾向がみられている。

これに対し可変容量ダイオードでは、やはりそれぞれの降伏電圧により出力電圧に抑制がかかり、 $x$  が  $0.1(T_{\text{on}}=2\mu\text{s}$ 、 $T_{\text{off}}=18\mu\text{s})$  を越えたあたりで、その降伏電圧の値に到達してしまうため、それ以降の  $T_{\text{on}}$  時間の増加に伴う出力の増加は見られなくなる。この降伏電圧による制御の影響で Duty 比  $x$  の変化をほぼ受けずに一定の出力が得られている。

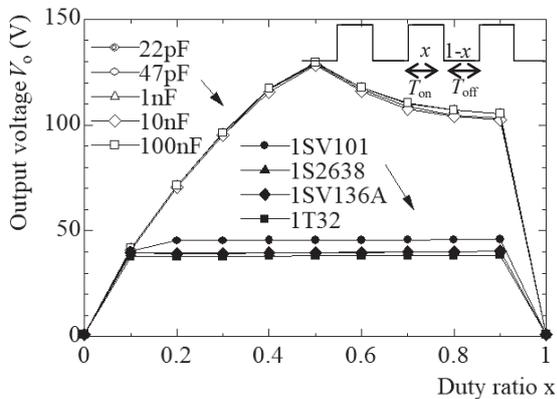


Fig. 8. Output characteristics by duty ratio

#### 4. まとめ

ここまで結果について総括する。この報告の主旨は、従来の昇圧チョッパ回路において、平滑、リップル電圧制御の役割をもつコンデンサを、印加される電圧の大きさと容量ならびにインピーダンスを変化させる可変容量ダイオードを用いることで、昇圧効率にどのような影響を及ぼすか調べ、さらに二次電池への充電効率への寄与を確認するものであ

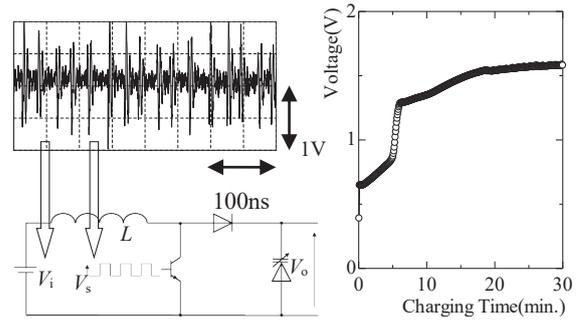


Fig. 9. Charging process using hollow noise as a voltage source

た。その結果、以下のような結果が得られた。

- (1) コンデンサに比べ利得は低下するものの、周波数の変化、負荷の変化に対して利得の変化は緩慢であり、一定利得の周波数帯をもつ。
- (2) 充電時の働きは、利得が小さめであってもコンデンサと同等の働きを示す。
- (3) 入力電圧  $V_i$ 、スイッチ用矩形波信号  $V_s$  の振幅ならびに Duty 比を変化させても、可変容量ダイオードを用いた昇圧チョッパ回路では、ダイオードの降伏電圧に影響を受けた一定の出力を示す。

本来昇圧チョッパ回路の昇圧制御は、入力に直流を用いた上で、前述したようにスイッチ制御の周波数と Duty 比を用いて行うが、可変容量ダイオードを用いると(3)の結果が示すように、そのような制御が出来なくなる。

この働きは、一般的な昇圧チョッパ回路のコンデンサに対して並列に Zener ダイオードを接続するのと同じ効果を示しているとも考えられる。

#### 5. 定電圧性を利用した応用例

この可変容量ダイオードを用いた昇圧チョッパ回路が、入力  $V_i$  とトランジスタのスイッチ用電圧  $V_s$  の変化に対して一様な出力電圧を持つ性質を用い、その応用を考える。この性質は、常に時間の変化に対して変動する信号を  $V_i$  や  $V_s$  に入力したとしても、ある程度の出力電圧  $V_o$  が得られる可能性を示唆している。

Fig.9 は、壁に直線状に張った  $15\text{m}$  のエナメル線に乗った中空のノイズ信号を入力  $V_i$ 、スイッチ用電圧  $V_s$  の両方に入力した際の二次電池 ( $3.6\text{V}$ 、 $80\text{mAh}$ ) への充電の様子である。実験の際に用いた中空の信号の振幅はおおよそ  $\pm 200\text{mV} \sim 1\text{V}$  である。 $V_s$  に関しては、このままでは  $0.7\text{V}$  を常時越えないため、

充電側と同様の 3.6V の二次電池を用いて単純なエミッタ増幅回路を用いた増幅信号を用いている。

この図から 30 分で 1.5V 程度の充電が出来ることが確認できたことから、中空のノイズでも二次電池充電のための電源となり得ることを示している。しかしながら、この信号を用いた時に二次電池の端子間にかかる昇圧された電圧が 2V 以下であったため、3.6V の二次電池にこれ以上の充電は望めない。そこでニッケル水素電池 1 セル(1.2V、30mAh 程度)に充電を試みたところ、増幅用に用いた 3.6V(1.2V・3 セル)が増幅のための電力供給を失うまでに、この 1 セル分の電池が 3~5 個充電可能であったことを確認している。例えば中空の信号でも、頻度が高く定期的に 0.7V を越えるものであれば  $V_s$  の増幅は必要なくなり、より効率よく充電出来る可能性がある。

また同じ様な応用として、振動を圧電素子を用いて電圧変換し、 $V_i$ 、 $V_s$  に入力することにより同様の結果が得られると考えられ、類似な様々な微弱な電気信号を二次電池充電のための電源として扱える可能性がある。

この様に昇圧チョッパ回路に可変容量ダイオードを用いることにより得られる一定の利得が、ノイ

ズのような定周期、定電圧を持たない信号を有効活用させられることを本報告で示せた。

#### 参考文献

- 1) Keiichi Ishida, Masaki Kanamori, Yohei Kubota, Takahisa Endo, Yasushi Yamanashi, Tetsuji Yamashita and Hiroshi Mochikawa, 電気学会論文誌 D, Vol.139, No.9, pp.776-783(2019)
- 2) Yoshihiro Miwa, Toshihisa Shimizu, Koushi Takano and Hitoshi Ishii, 電気学会論文誌 D, Vol.137, No.5, pp385-394(2017)
- 3) Yasuo Sasaki, Yusuke Sugihara, Kimihiro Nanamori and Masayoshi Yamamoto, 電気学会論文誌 D, Vol.136, No.10, pp778-783(2016)
- 4) Shizumasa Okudaira and Kouki Matsuse, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.3, pp276-283(2015)
- 5) Takahiro Kawashima and Masayoshi Yamamoto, 電気学会論文誌 D, Vol.133, No.4, pp.428-435(2013)