

## 環境磁界発電用電力変換回路の最適負荷条件の検討 -Cockcroft-Walton 回路による考察-

### Consideration of impedance matching on power conversion circuit for magnetic energy harvesting - With Cockcroft-Walton circuit -

田代 晋久\*<sup>1</sup>(正員), 脇若 弘之\*<sup>1</sup>(正員), 池上 梓\*<sup>1</sup>(学生員)

Kunihisa TASHIRO (Mem.), Hiroyuki WAKIWAKA (Mem.), Azusa IKEGAMI (Stu. Mem.)

In recent years, energy harvesting is an attractive research for worldwide engineers. An environmental magnetic field around power lines and electric appliances could be regarded as a reusable energy source. This paper considers the impedance matching on power conversion circuit for magnetic energy circuit. The Cockcroft-Walton circuit consisting of ideal diodes are used for this considerations. Based on the maximum power transfer theorem, the optimum load is expressed by the two parameters: input resistance and number of steps in the Cockcroft-Walton circuit. From both the analysis and experimental results, the estimated output voltage and power are confirmed.

**Keywords:** Cockcroft-Walton circuit, impedance matching, magnetic energy harvesting

#### 1 緒言

近年, 生活環境下に存在する未利用なエネルギーを電力に変換する環境発電技術が注目されており, 研究が盛んに行われている[1,2]。また環境発電により得られた電力を無線ノードの電源として利用することで, メンテナンスフリー及び配線が不要となるため, 農業, インフラ, 防災, 交通などの多くの分野において適用が期待されている[3-5]。著者らは, 生活環境下に存在する商用周波数磁界に着目し, この磁界を利用した環境磁界発電について研究を行っている[6-9]。生体への電磁界ガイドライン値(ICNIRP2010)により, 25~400 Hzの周波数帯域において 200  $\mu$ T が公衆環境における磁界暴露参照レベルの上限として定められている[10]。環境磁界発電では, こうしたガイドライン値以下の磁界を再生可能エネルギーとして回収を行う。環境磁界発電は配線を必要とせず直接電力を回収できる利点を有する。またガイドライン値以下の一様磁界を大空間に発生させることで, 非接触給電としての応用も可能である[11]。

無線ノードの電源として応用するには, 得られた電力を整流, 昇圧及び降圧等の変換を行う電力変換回路が必要である。環境磁界発電への電力変換回路として

Cockcroft-Walton 回路(以降, CW 回路)を検討している。ダイオードとコンデンサのみで構成され, 市販の電力変換回路等と比較し良好な電力変換効率が得られている[8-9]。CW 回路は構成要素を多段にすることで段数倍の開放電圧が得られる。

商用周波数に限定した環境磁界発電では, 共振用コンデンサの挿入が有効である。磁界発電モジュールと負荷を直結する場合は, 最大電力供給の定理に基づき最適負荷および供給可能な電力を推定できる[7]。CW 回路を用いる場合, 接続する負荷と CW 回路の段数により, 負荷に供給される電圧・電力が変化する[8-9]。そのため, 共振用コンデンサの有無と CW 回路の段数に応じた最適負荷を設計する必要がある。

本報告では, 理想ダイオードを仮定し最大電力供給の定理に基づき最適負荷抵抗に供給される電圧と電力の理論式を導出した。磁界発電モジュールを電圧源と内部抵抗に置換し, CW 回路に入力(以降, 発振器入力)した条件で理論式の妥当性を確認した。また, 磁界発電モジュールと共振用コンデンサを直列接続したものを, CW 回路へ入力(以降, 磁界発電モジュール入力)に対しても同様の検討を行ったので報告する。

#### 2 原理

##### 2.1 環境磁界発電装置の構成

Fig. 1 に今回検討する環境磁界発電装置の構成を示

連絡先: 田代晋久, 〒380-8533 長野県長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部 電気電子工学科  
e-mail: tashiro@shinshu-u.ac.jp

\*<sup>1</sup>信州大学

す。磁界発電モジュール、電力変換回路、負荷の3つで構成される。磁界発電モジュールは空心コイルを用い、共振周波数が 60 Hz となる共振用コンデンサを挿入した。Table 1 に今回使用した磁界発電モジュールの仕様を示す。電力変換回路には CW 回路を用いた。前報[9]では安定した直流電圧を出力するための蓄電・過電圧制限回路を付与した電力管理モジュールを提案したが、今回は最適負荷検討のため省略した。

### 2.2 磁界発電モジュール

Fig. 2 に磁界発電モジュールに負荷を直結した場合の等価回路を示す。テブナンの定理より、回路中の等価電圧源はコイル開放時の誘起電圧  $V_{in}$  (V) で記述できる。ファラデーの電磁誘導の法則より  $V_{in}$  は次式で与えられる。

$$V_{in} = \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi fnBS \quad (V) \quad (1)$$

ここで、 $\Phi$  (Wb) は総磁束鎖交数、 $f$  (Hz) は周波数、 $n$  (turn) はコイルの巻き数、 $B$  (T) は磁束密度、 $S$  (m<sup>2</sup>) は鎖交断面積を示している。コイル抵抗  $R$  (Ω) とインダクタンス  $L$  (H) より、コイルのインピーダンス  $Z_{coil}$  (Ω) は次式で記述できる。

$$Z_{coil} = R + j\omega L \quad (\Omega) \quad (2)$$

コイルに共振用コンデンサ  $C$  (F) と負荷抵抗  $R_L$  (Ω) を接続した RLC 直列回路のインピーダンス  $Z$  (Ω) は次式で記述できる。

$$Z = (R + R_L) + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (\Omega) \quad (3)$$

虚数成分が 0 となる共振周波数においてインピーダンスは最小となる。最大電力供給の定理より、コイル抵抗  $R$  (Ω) と同値の負荷抵抗  $R_L$  (Ω) へ供給される電圧  $V_{out}$  (V) と電力  $W$  (W) の関係は式(4)で記述できる。

$$W = \frac{V_{out}^2}{R_L} = \frac{V_{in}^2}{4R} \quad (W) \quad (4)$$

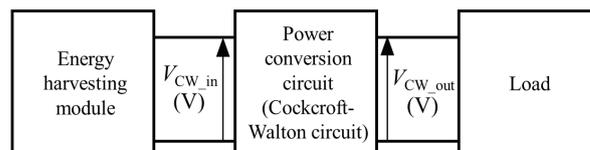


Fig.1 Composition of magnetic energy harvesting device.

Table 1 Specifications of the energy harvesting module.

Property	Value
Resistance, $R$ (Ω)	1060
Inductance, $L$ (H)	60.4
Resonant capacitance, $C$ (μF)	0.117
Resonant frequency, $f$ (Hz)	60

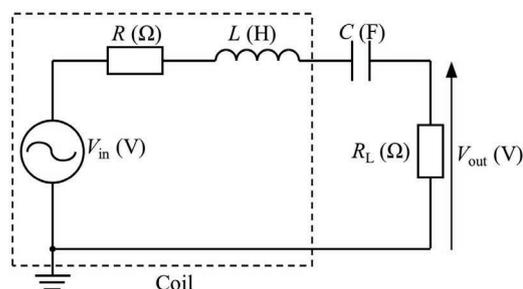


Fig.2 Equivalent circuit of the energy harvesting module connected to the load.

### 2.3 CW 回路

Fig. 3 に CW 回路に負荷を接続した等価回路を示す。2つのコンデンサ  $C_{CW}$  (F) とダイオード  $D_1, D_2$  で基本構成となる CW 回路 2 段が構成できる。同じ CW 回路 2 段を後段に直列接続することにより CW 回路  $n$  段を構成できる。無負荷時における CW 回路出力電圧  $V_{CW}$  (V) は、入力電圧  $V_{CW\_in}$  (V) の波高値と CW 回路の段数  $s$  倍の電圧が得られる。実際にはダイオードにおける電圧降下があるためこの値に比べ小さな値となる<sup>8)</sup>。理論値との比を  $\alpha$  と定義すると、式(5)で記述できる。

$$V_{CW} = \sqrt{2}V_{CW\_in} \cdot s \cdot \alpha \quad (V) \quad (5)$$

Fig. 4 に発振器入力モデルに対する等価回路図を示す。CW 回路はダイオードを +0 V でオンする理想スイッチを考え、無損失回路とした。最大電力供給の定理より、抵抗  $R$  (Ω) における消費電力  $W_1$  (W) と負荷  $R_L$  (Ω) における  $W_2$  (W) が等しい場合を考える。抵抗  $R$  (Ω) に印加される電圧は入力電圧  $V_{in}$  (V) であるため、 $W_1$  (W)

および CW 回路に入力される電圧  $V_{CW\_in}(V)$  は次式で記述できる。

$$W_1 = V_{in}^2 / 4R \quad (W) \quad (6)$$

$$V_{CW\_in} = V_{in} / 2 \quad (V) \quad (7)$$

CW 回路は無損失であるため、式(5)において  $\alpha = 1$  (無損失) を仮定し、式(7)を代入することで負荷接続時の CW 回路出力電圧  $V_{CW\_out}(V)$  を考える。入力電圧  $V_{in}(V)$  に対する  $V_{CW\_out}(V)$  および  $W_2(W)$  は次式で記述できる。

$$V_{CW\_out} = \frac{\sqrt{2}}{2} V_{in} \cdot s \quad (V) \quad (8)$$

$$W_2 = \frac{V_{CW\_out}^2}{R_L} = \frac{(\sqrt{2}sV_{in}/2)^2}{R_L} \quad (W) \quad (9)$$

$W_1 = W_2$  であるため、式(6), (9)より以下の等式が成り立つ。

$$\frac{V_{in}^2}{4R} = \frac{(sV_{in})^2}{2R_L} \quad (W) \quad (10)$$

上式より、 $s, R, R_L$  の関係式が得られる。この時の負荷  $R_L$  を最適負荷  $R_{ideal}(\Omega)$  と定義する。最適負荷の理論式は次式で与えられる。

$$R_L = 2s^2 R \quad (\Omega) \quad (11)$$

### 3 発振器入力に対する最適負荷条件

#### 3.1 解析・実験方法

前章では最大電力供給の定理から負荷に供給される電圧  $V_{CW\_out}$  と電力  $W_2$  の関係から最適負荷  $R_{ideal}$  を導出した。最適負荷の妥当性を確認するため、発振器入力における回路解析および実験を通じた検証を行った。Table 2 に検討条件を示す。R は磁界発電モジュールと同じ値とした。最適負荷  $R_{ideal}$  は式(11)より導出した値を採用した。CW 回路の段数は 2, 4, 6, 8, 10 を検討した。前報までの成果を踏まえ、CW 回路内のコンデンサ  $C_{CW}(F)$  は  $47 \mu F$ 、ダイオードは

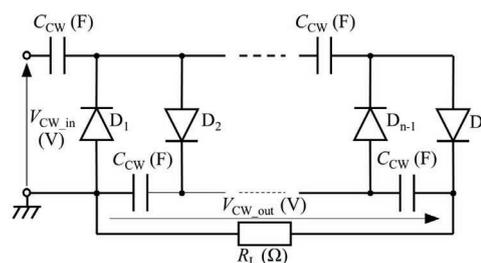


Fig.3 Cockcroft-Walton circuit connected to the load. (n steps)

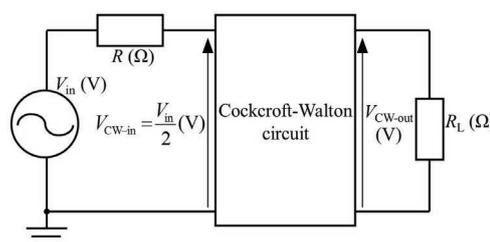


Fig. 4 Equivalent circuit for the oscillator input model.

Table 2 Conditions for the oscillator input model.

Property	Value				
Input voltage, $V_{in}(V)$	5				
Frequency, $f(Hz)$	60				
Resistance, $R(\Omega)$	1060				
Load, $R_{ideal}(k\Omega)$	8.480	33.92	76.32	135.7	212.0
Number of steps, $s$	2	4	6	8	10

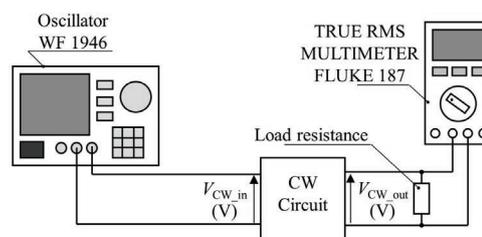


Fig.5 Schematic design of experimental setup for the oscillator input model.

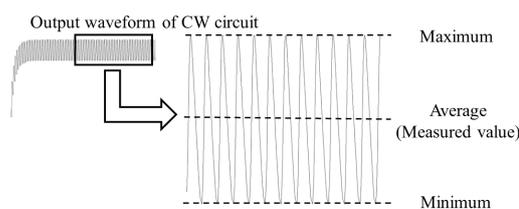


Fig.6 An example of output voltage waveform simulated by LTSpice.

IN5818 (ショットキーバリアダイオード, 以降 SBD) として行った。負荷接続時の CW 回路出力電圧  $V_{CW\_out}$  は式(8)で、電力  $W_2$  は式(9)で導出されているため、算出した  $R_{Ideal}$  に対して両式を満足するかを確認した。

実験では内部抵抗  $50 \Omega$  の発振器(WF1946, NF 社製)と CW 回路の間に直列に抵抗を接続し、 $R$  の値を磁界発電モジュールの抵抗に近い値で模擬を行った。Fig. 5 に実験概略図を示す。 $V_{CW\_out}$  はテスタ (TRUE RMS MULTIMETER, FLUKE 187)を用いて測定し、理論値および回路解析結果との比較を行った。

回路解析では理想素子や現実に近い素子を模擬できる LTSpice を用いた。Fig.6 に LTSpice による解析結果の一例を示す。CW 回路の出力波形は過渡応答を含み、定常状態においてもリップルが発生する。そのため、定常状態に推移し十分時間が経過した波形を出力電圧として採用した。CW 回路出力電圧はリップル振幅の最大・最小を平均した値を解析値とした。 $V_{CW\_out}$  の確認には CW 回路内のダイオードとして、+0 V で導通するオン抵抗  $1 \mu\Omega$  の理想スイッチと、SBD の 2 種類を検討した。電力  $W_2$  の確認には、CW 回路内のダイオードを理想スイッチとし、負荷抵抗  $R_L$  を  $10 \Omega$  から  $1 M\Omega$  まで変化させた。

### 3.2 最適負荷に対する $V_{CW\_out}$

Fig.7 に段数  $s$  に対する  $V_{CW\_out}$  の理想スイッチを用いた解析値、SBD を用いた解析値、実測値および式(8)で得られた理論値との比較結果を示す。どの段数においても理論値と理想スイッチを用いた解析値の誤差は 5%以内で一致した。本結果より、式(11)で与えられる最適負荷接続時の CW 回路出力電圧は式(8)で推定できることを確認した。すべての解析・実験結果は段数の増加とともに理論値に比べ低下した。理論値との差は、理想スイッチの解析値、実測値、SBD の解析値の順で低下の値が大きくなった。一方、実測値と理論値との相対誤差は全段数において 10%以下であり、今回提案した理論式が十分利用できることを確認した。

### 3.3 最適負荷に対する $W_2$

Fig.8 に CW 回路へ接続した負荷抵抗  $R_L$  の値に対し、消費される電力  $W$  (W) の関係を示した。段数  $s$  をパラメータとし、理想スイッチを用いた解析値をプロットしてある。塗りつぶしマーカは式(11)で得られた最適負荷  $R_{Ideal}$  を接続した時の解析値を示す。式(9)で示される  $W$  の最大値  $W_2$  も図中に示した。なお、式(6)は段数  $s$  に依存した形で記述されているが、

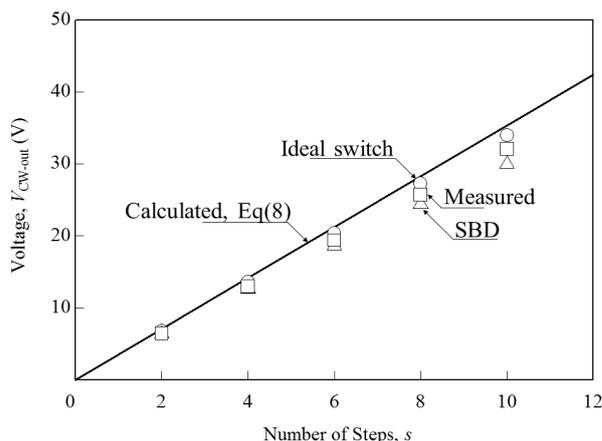


Fig.7  $V_{CW\_out}$  as a function of  $s$  for the oscillator input model. Plots represent the simulated and measured results.

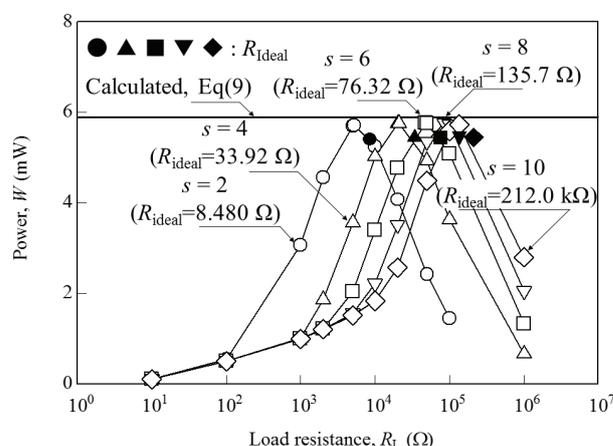


Fig.8  $W_2$  as a function of  $R_L$  for the oscillator input model. Plots represent the simulated results with ideal switches.

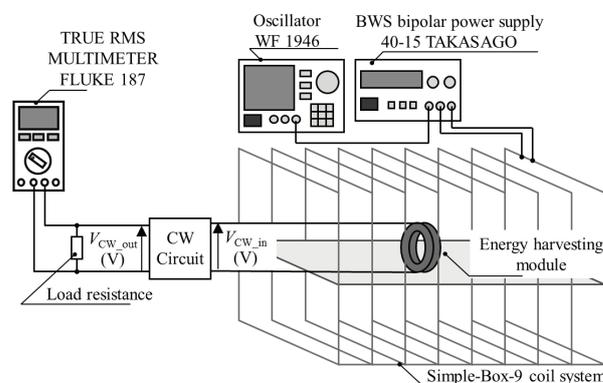


Fig.9 Schematic design of experimental setup for the magnetic energy harvesting module input model.

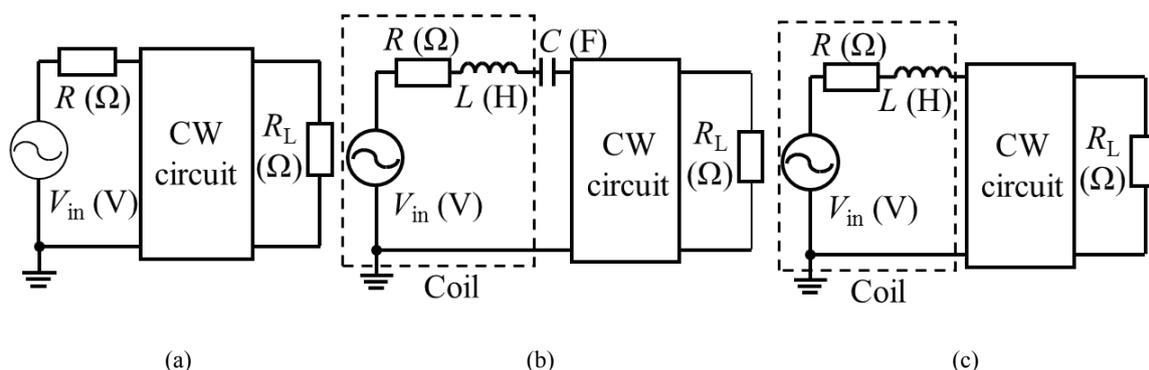


Fig.10 Measurement circuit for energy harvesting module.

最大電力供給の定理より  $W_1 = W_2$  の関係が成り立つ。つまり、段数によらず式(6)で与えられる一定値となる。この値と  $R_{ideal}$  接続時に得られる電力  $W_2$  は、全段数において最大電力との相対誤差が 6 % 以内で一致した。本結果より、提案式の妥当性を確認することができた。一方、解析結果より最大電力が得られた負荷はそれぞれ 5.250, 21.00, 48.00, 85.00, 13.50 k $\Omega$  であった。この負荷抵抗の値は、 $R_{ideal}$  と比較し 40 % 程度小さな値であった。

#### 4 磁界発電モジュール入力に対する最適負荷条件

##### 4.1 解析・実験方法

共振用コンデンサを挿入した磁界発電モジュールは、コイルのインダクタンス成分を無視した扱いが行える。つまり、発振器入力と同じ扱いができると推測した。Fig.9 に磁界発電モジュール入力で検討した実験概略図を示す。磁界発電モジュールの開放電圧が前章と同じく 5 V となるように Simple-Box-9 コイルシステムで 60 Hz の一様磁界(ICNIRP2010 ガイドライン値の 1/10 程度の磁界強度) を発生させた。前章と同じ CW 回路を接続し、同様の実験および回路解析を行った。

##### 4.2 共振用コンデンサの有用性

共振用コンデンサの有用性を確認するため、理想スイッチを用いた回路解析を行った。Fig. 10 に検討した 3 つの等価回路を示す。(a)は発振器入力、(b)は共振用コンデンサを挿入した磁界発電モジュール、(c)は共振用コンデンサを挿入しない磁界発電モジュールを示す。Table 1 に記載した  $R, L, C$  の値を用い、Table 2 の条件で解析を行った。Fig. 11 に段数  $s$  に対する  $V_{CW\_out}$  の理想スイッチを用いた解析値、

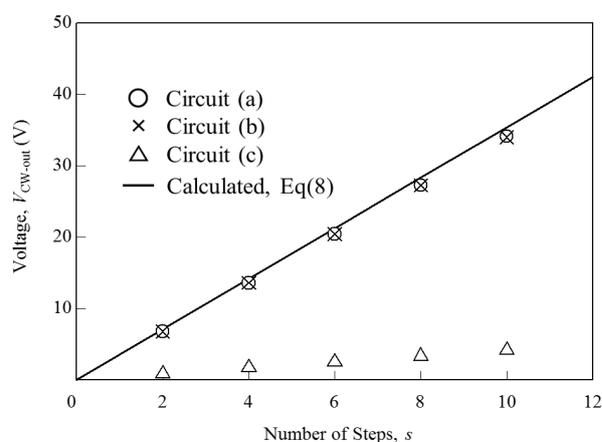


Fig.11  $V_{CW\_out}$  as a function of  $s$ . Plots represent the simulated results with ideal switches.

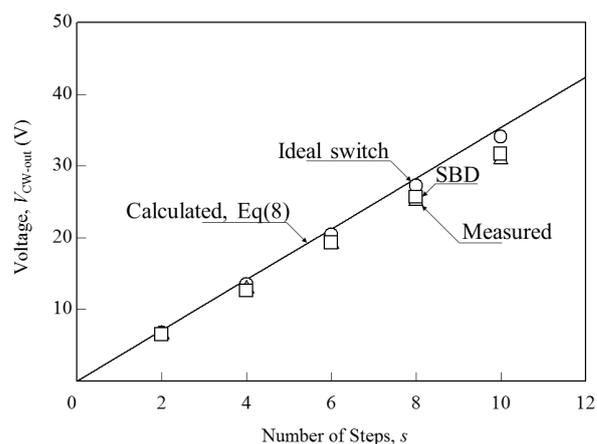


Fig.12  $V_{CW\_out}$  as a function of  $s$  for the magnetic energy harvesting module input model. Plots represent simulated and measured results.

および式(8)で得られた理論値との比較結果を示す。共振用コンデンサを挿入しない場合、得られる  $V_{CW\_out}$  の値は著しく低下することを確認した。

#### 4.3 最適負荷に対する $V_{CW\_out}$

Fig. 12 に段数  $s$  に対する  $V_{CW\_out}$  の理想スイッチを用いた解析値, SBD を用いた解析値, 実測値および式(8)で得られた理論値との比較結果を示す。理論値と比較すると、段数の増加とともに解析値・実測値は低下した。SBD を用いた解析値と実測値はほぼ一致した値が得られた。

#### 4.4 最適負荷に対する $W_2$

Fig.13 に CW 回路へ接続した負荷抵抗  $R_L$  の値に対し、消費される電力  $W$  (W) の関係を示した。段数  $s$  をパラメータとし、理想スイッチを用いた解析値をプロットしてある。塗りつぶしマークは式(11)で得られた最適負荷  $R_{ideal}$  を接続した時の解析値を示す。最大電力が得られた負荷抵抗の値は、 $R_{ideal}$  とは異なる値となった。最大電力が得られる抵抗値はそれぞれ 5.05, 22.00, 48.00, 110.0, 130.0 k $\Omega$  と  $R_{ideal}$  より 40% 程度小さい値であり、発振器入力の際と近い結果となった。最大電力と  $R_{ideal}$  を接続時の電力は、全段数において相対誤差 6% 程度で一致した。以上の結果より、発振器入力と共振用コンデンサを挿入した磁界発電モジュール入力は同じモデルとして扱えることを確認した。

### 5 結言

本報告では、環境磁界発電用電力変換回路の最適負荷条件の検討を行った。CW 回路を用いた理論・解析・実験結果を通じ、得られた結果を下記に示す。

- (1) 磁界発電モジュールを電圧源と内部抵抗に置換し、CW 回路に入力される発振器入力モデルより、最適負荷抵抗と供給される電圧・電力を与える理論式を導出した。
- (2) 解析・実験結果を通じ、発電器入力モデルにより導出された理論式の妥当性を確認した。
- (3) 環境磁界発電装置においても、共振用コンデンサの挿入により、発振器入力モデルとして扱えることを確認した。

**謝辞** この研究の一部は平成 25 ~ 27 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C), 課題番号 25502001) の補助を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

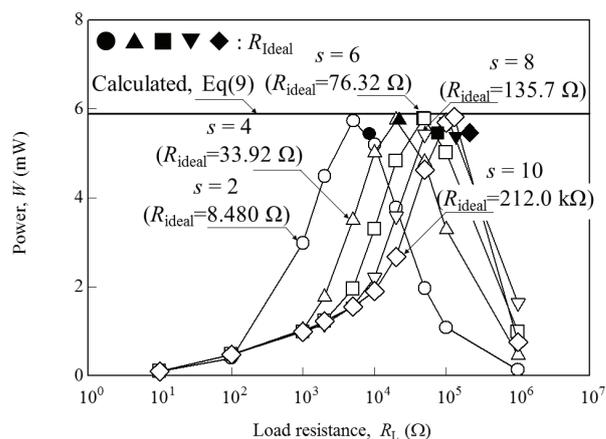


Fig.13  $W_2$  as a function of  $R_L$  for the magnetic energy harvesting module input model. Plots represent the simulated results with ideal switches.

(2014 年 9 月 30 日受付, 2015 年 4 月 20 日再受付,  
2015 年 8 月 20 日再々受付)

### 参考文献

- [1] 千葉義人, 吉田将也, 木谷友哉, 萬代雅希, 渡辺尚, 無線センサネットワークにおけるエネルギーハーベストに関する考察, 情報処理学会第 73 回全国大会講演論文集, pp.163-164, 2011.
- [2] 竹内敬治, エナジーハーベスティングの現状, 伝熱, Vol.52, No.218, pp.1-5, 2013.
- [3] 松本佳宜, 環境用センサ, 電気学会誌, Vol.134, No.3, pp.140-143, 2014.
- [4] 奥良彰, 室内照明による高効率環境発電デバイスと自立電源の開発, 電気学会誌, Vol.133, No.4, pp.214-217, 2013.
- [5] 猿渡俊介, 森戸貴, 南正輝, 森川博之, バッテリーレス無線センサネットワークと省メモリ型データ収集プロトコル, 情報処理学会誌, Vol.55, No.1, pp.1-14, 2014.
- [6] K. Tashiro, H. Wakiwaka, S. Inoue, and Y. Uchiyama, Energy harvesting of magnetic power-line noise, IEEE Transactions on Magnetics, 47(10), pp.4441-4444, 2011.
- [7] K. Tashiro, H. Wakiwaka and Y. Uchiyama, Theoretical design of energy harvesting module or wireless power transmission receiver using magnetic field of 0.2 mT at 60 Hz, Journal of Energy and Power Engineering 7, pp. 740-745, 2013.
- [8] K. Tashiro, H. Wakiwaka, Y. Uchiyama and G. Hattori, Design of AC-DC converter for magnetic energy harvesting device, Sensing Technology: Current Status and Future Trends I, Smart Sensors, Measurement and Instrumentation Volume 7, Springer, pp. 297-308, 2014.
- [9] 田代晋久, 脇若弘之, 内山悠, 環境磁界発電を用いた蓄電回路の検討, 日本 AEM 学会誌, pp.308-313, 2013.
- [10] ICNIRP, Guideline for limiting exposure to time-varying electric and magnetic field (1 Hz to 100 kHz), Health physics Vol.99 No.6, pp.818-836, 2010.
- [11] 池上梓, 中野亮, 田代晋久, 脇若弘之, 環境磁界発電用 Simple-Box-9 コイルシステムの評価, 電気学会研究会資料, MAG-13-093, pp.45-50, 2013.