学術論文

環境磁界発電を用いた蓄電回路の検討

Consideration of Energy Storage Circuits for Magnetic Energy Harvesting

田代　晋久[*1]（正員），脇若　弘之[*1]（正員），内山　悠[*1]

Kunihisa TASHIRO (Mem.), Hiroyuki WAKIWAKA (Mem.), Yu UCHIYAMA

In this paper, we propose an energy storage circuits for magnetic energy harvesting. We successfully harvested 104 mW from applied magnetic field of 90 μT at 60 Hz. This magnetic field is smaller than the value that ICNIRP2010 guideline provided. In order to use effectively the harvested energy, we consider energy storage circuits. Because an increase in an output voltage produced an increase in the storage energy, we use Cockcroft-Walton circuit for transform AC to DC voltage and step up voltage. Our proposed storage circuit consists of Cockcroft-Walton circuit, capacitor, and constant voltage circuit. It was found that the storage energy was proportional to the square of number of Cockcroft-Walton circuit steps. From experiments, we successfully demonstrate that our energy harvesting device can provide an energy of 1 J for magnetic flux density of 5.43 μT.

Keywords: magnetic energy harvesting, energy storage circuit, Cockcroft-Walton circuit, energy harvesting module, power conditioning module.

1 はじめに

我々は，電化製品や送電線から生じている磁界を利用し，常時電力回収が可能な環境磁界発電を提案している[1-3]。他の発電方式と異なり，外部の状況，天気に左右されないという利点を有する。我々の開発した環境磁界発電モジュールは ICNIRP2010 ガイドライン値の 200 μT 以下の 60 Hz，90 μT の磁界から 104 mW の電力回収が可能である[3, 4]。本モジュールの回収電力は磁束密度の 2 乗に比例して増加する。前報では 20 μT の磁界から 6.32 mW の電力を回収し，ワイヤレスセンサの駆動に成功した[5]。

環境磁界発電モジュール単体の回収電力は，モジュールと同じ抵抗値を有する疑似負荷を接続して評価を行ってきた。環境磁界発電で得られた電力を目的の回路で直接駆動させるためには整流回路，定電圧回路で構成される電力管理モジュールが必要となる[6]。著者らは環境磁界発電モジュールと全波整流回路，昇圧 DC-DC コンバータを組み合わせた電力管理モジュールの効率を評価した[2]。効率は，環境磁界発電モジュール単体で回収できる電力を基準として評価した。24.7 μT 以上の印加磁界ならば整流回路の効率は 80 % 以上となった。しかし，昇圧 DC-DC コンバータで定電圧出力することで電力管理モジュールの効率は 1% 以下となった。

これらの問題点から，整流・昇圧回路として，高周波電磁界を利用する RFID タグや環境発電において検討が進んでいる Cockcroft-Walton 回路[7]（以下，CW 回路）に注目した。理想的な CW 回路は，入力電圧の波高値に対し，CW 回路の段数倍の出力電圧が得られる。前報[8]では環境磁界発電モジュールと CW 回路を組み合わせ，CW 回路の段数と効率ついて検討を行った。その結果，環境磁界の大きさ（CW 回路の入力電圧）と疑似負荷の条件により，最大の効率が得られる最適な段数があることを明らかにした。

本報告では，蓄電回路を含む電力管理モジュールの見直しを行った。得られる電力が小さくとも，時間をかけて 1 J 程度の電力量を蓄電できれば，Table 1 に示すようなデバイスの間欠駆動が可能となる[9, 10]。開発済の環境磁界発電モジュールと組み合わせた環境磁界発電装置を試作し，下記 3 点の検討を行った。

Table 1　Energy consumption in mobile devices [9, 10].

Device	Energy per second (mJ/s)
Quartz watch	0.005
Wireless sensor node	0.100
Heart rate meter	0.833
Respiratory rate meter	0.833
MP3 player	97.2
Mobile phone (conversation)	778
Mobile phone (standby)	41.6

連絡先：田代　晋久，〒380-8553 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
[*1] 信州大学

1 点目は，最適な蓄電回路の構成法と，1 J あるいは 1 mJ を蓄電するために必要な環境磁界の大きさと所要時間を調査した。全波整流回路を用いた蓄電回路との比較も行い，CW 回路の利点について考察した。2 点目は，蓄電用キャパシタや降圧 DC-DC コンバータ等の素子破損を防ぎ過電圧を視覚的に通知するため，LED を用いた過電圧制限回路を検討した。これにより，回収した電力のみで環境磁界の存在を視覚的に通知・警告することもできる。3 点目は，回収した電力量の利用効率について調査した。環境磁界発電装置が蓄電した電力量に対し，8 割の電力量を疑似負荷に定電圧出力できたことを確認した。

2 環境磁界発電装置

2.1 構成

Fig. 1 に環境磁界発電モジュール(Energy harvesting module)と電力管理モジュール(Power conditioning module)を組み合わせた環境磁界発電装置の構成を示した。前報では, Fig. 1(a)のダイオードによる整流回路，昇圧型 DC-DC コンバータを用いた電力管理モジュールを用いた。この構成では電力管理モジュールの効率が 1%以下となり回収した電力を有効利用できなかった[3]。本報告では，Fig. 1(b)の CW 回路による整流・昇圧回路と蓄電用コンデンサを組み合わせた蓄電回路(Energy strage circuit)，LED による過電圧制限回路，降圧 DC-DC コンバータによる定電圧出力回路を用いた電力管理モジュールの検討を行った。

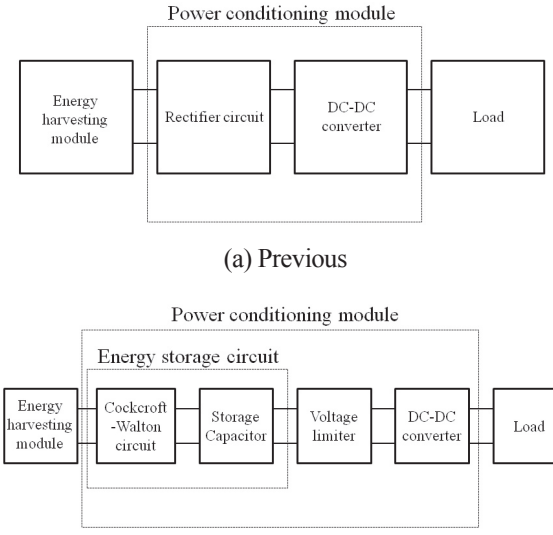


Fig. 1　Block diagram of energy harvesting device.

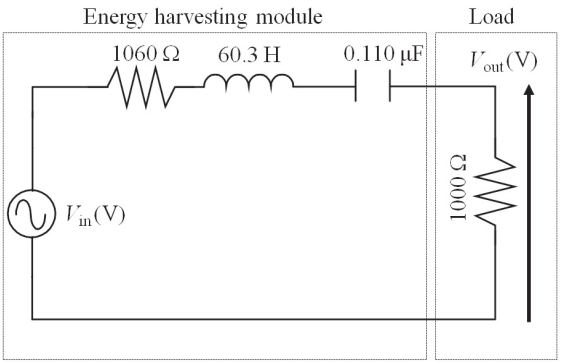


Fig. 2　Equivalent circuit of the energy harvesting module.

Table 2　Specifications of the energy harvesting module.

Property	Value
Mean radius, a (m)	0.105
Number of turns, n (turn)	18395
Inductance of coil, L (H)	60.3
Resistance of coil, R (Ω)	1060
Resonant capacitor, C (μF)	0.110
Dummy load, R_L (Ω)	1000
Resonance Frequency, f_i (Hz)	60

2.2 環境磁界発電モジュール

Fig. 2 に環境磁界発電モジュールの等価回路, Table 2 にパラメータを示した。ファラデーの電磁誘導の法則よりコイル両端には電圧 V_{in} (V)が誘起される。V_{in} (V)は式(1)で示される。

$$V_{in} = 2\pi^2 fna^2 \mu_0 H \quad \text{(V)} \tag{1}$$

ここで，f(Hz)はコイルに鎖交する磁束の周波数，n はコイル巻数(turn)，a(m)はコイルの平均半径，$\mu_0 H$ (T)はコイルに鎖交する平均磁束密度を表す。商用周波数 60 Hz に共振点を合わせるため，コイルに直列に共振用コンデンサ C(F)を接続した。負荷側には最大電力供給の定理より，コイル抵抗と同じ抵抗値の疑似負荷抵抗 R_L(Ω)を接続した。以上を組み合わせたものを環境磁界発電モジュールとした。Fig. 3 に磁束密度に対する誘起電圧を示した。最大電力を取り出す時，疑似負荷両端の電圧は誘起電圧を 2 分の 1 された値となる。

2.3 CW 回路

Fig. 4 に 2 段の CW 回路の回路図を示した。CW 回路により，入力された交流電圧の波高値を倍電圧直流に変換できる。ダイオードは低順方向電圧ショットキーダイオード(1N5818, ST Microelectronics corp.)を用い

た。コンデンサには LTSpice を用いた回路解析よりリップル電圧含有率（出力電圧に含まれるリップル電圧波高値の比）が小さく，立ち上がり時間が短い 47 μF を選択した。Fig. 5 に 60Hz 入力電圧 1 $V_{p\text{-}p}$ における 2 段 CW 回路の解析結果を示す。本論文では CW 回路の段数を *s* とし，2，4，6，8，10 段を製作した。

2.4 蓄電回路

蓄電回路は CW 回路，蓄電用コンデンサから構成される。蓄電用キャパシタのキャパシタンスを *C*s[F]，両端直流電圧を V_{out} [V]とすると，蓄電され電力量は式(2)で記述できる。

$$P = \frac{1}{2} C_s V_{out}{}^2 \quad \text{(J)} \tag{2}$$

本報告では 1J の蓄電実証を目的とし，10 mF，耐電圧 64 V のキャパシタを用いた。上式より，1 J の電力量に対応する両端直流電圧は 14.1 V となる。

2.5 電力管理モジュール

電力管理モジュールは CW 回路による整流・昇圧回路と蓄電用コンデンサを組み合わせた蓄電回路，LED による過電圧制限回路，降圧 DC-DC コンバータによる定電圧出力回路から構成される。CW 回路を用いた場合，段数の増加に伴って蓄電用コンデンサの耐電圧 64 V を超えてしまう。視覚的に蓄電状態を示すとともに 出力電圧を制限するために LED の特性を利用した過電圧制限回路を製作した。用いた赤色 LED(SLI-325 series, ROHM corp.)は事前実験で点灯し始める順方向電圧が 1.60 V，消費電力 42 μW を確認した。この LED を直列に接続する数を変えることで，順方向電圧以上は出力されない過電圧制限回路を構成できる。

デバイスへの駆動に用いるためには得られた電圧を例えば 3.3, 5.0 V のように高効率かつ定電圧化する必要がある。本報告では CW 回路により出力電圧は段数により制御できるため，高効率降圧 DC-DC コンバータ（LTC3588 デモボード，Linear Technology）を用いた。Table 3 に LTC3588 の性能を示した[11]。入力電圧範囲は 6~18 V であるが 80%以上の高効率で動作することを事前実験より確認した。出力電圧は，ワイヤレスセンサ駆動電圧の 3.3 V とした。

Table 3　Specifications of LTC3588.

Parameter	Value
Start-up voltage (V)	6 ~ 18
Output voltage (V)	1.8, 2.5, 3.3, 3.6

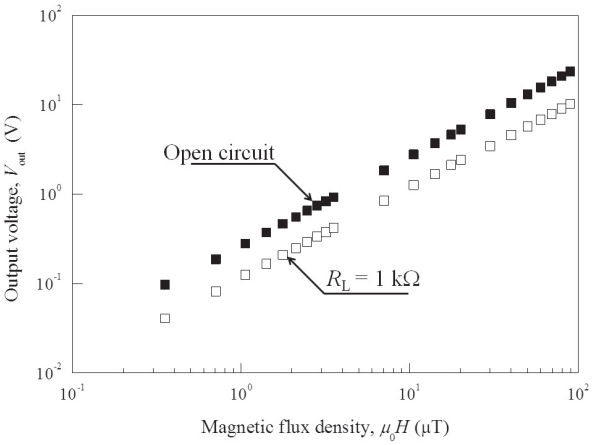


Fig. 3　The output voltage of the energy harvesting module as a function of magnetic flux density.

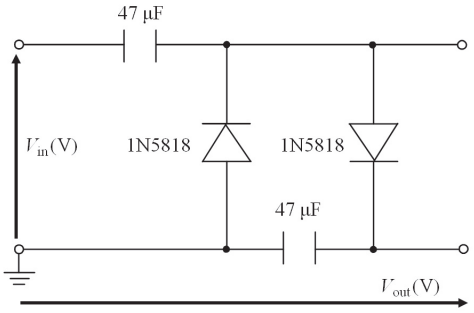


Fig. 4　Cockcroft-Walton circuit (*s* = 2).

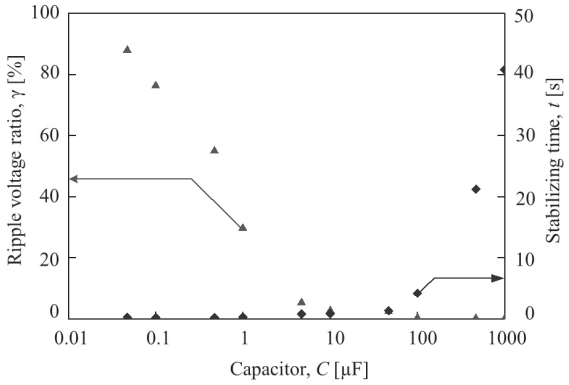


Fig. 5　Simulated result of the ripple voltage ratio and stabilizing time as a function of the capacitance.

3 実験方法

3.1 蓄電回路

測定概略図を Fig. 6 に示した。環境磁界を模擬するために一様磁界発生コイルとして Simple-Cubic-3 コイル（以下，SC3）を用いた[12,13]。一方向へ一様な磁界を発生させるため，一辺が 2 m の 3 つの正方形コイルを一辺の長さの半分の間隔で並べた構造であり，24:12:24 の巻数比を有する。中心から半径 50 cm の球領域内で偏差 1%以内の一様な磁界を発生できる。この SC3 を用いて 60 Hz 固定で, 磁界強度を 0.353~90 μT まで変化させた。この時，環境磁界発電モジュールを SC3 の中心に設置し, その後段に蓄電回路を接続した。蓄電キャパシタ C_s = 10 mF の両端電圧 V_{out}(V)をテスタ(TRUE RMS MULTIMETER, FLUKE 187)を用いて測定し，蓄電キャパシタの耐電圧を超えない範囲で実験を行った。電力量 P(J)は蓄電キャパシタ両端電圧から式(2)を用いて算出した。

全波整流回路と CW 回路の違いによる蓄電回路の充放電特性の比較も行った。蓄電キャパシタを放電後，60 Hz，90 μT の磁界を 1 時間印加し，その後磁界を印加せずに 2 時間測定を行った。

3.2 環境磁界発電装置

環境磁界発電装置における過電圧制限回路の評価を行った。降圧 DC-DC コンバータの最大入力電圧公称値の 18 V 以下となるように，10 個の LED を直列に接続して過電圧制限回路を構成した。SC3 で 60 Hz, 0.353~90 μT の磁界を印加し, 蓄電キャパシタ両端電圧を実測した。本実験では，降圧 DC-DC コンバータは接続せず，過電圧制限と LED 点灯による視覚的通知の確認を行った。蓄電回路は全波整流回路と 2 段 CW 回路の 2 つで比較を行った。

環境磁界発電装置における定電圧出力回路の評価を行った。蓄電回路に蓄電した 1 J の電力量に対し，環境磁界発電装置に接続した疑似負荷に供給可能な電力量を実測した。装置の出力電圧は 3.3 V とし，疑似負荷抵抗は 1 kΩとした。1 kΩの負荷で 3.3 V 出力した場合，消費電力は 10.9 mW となる。

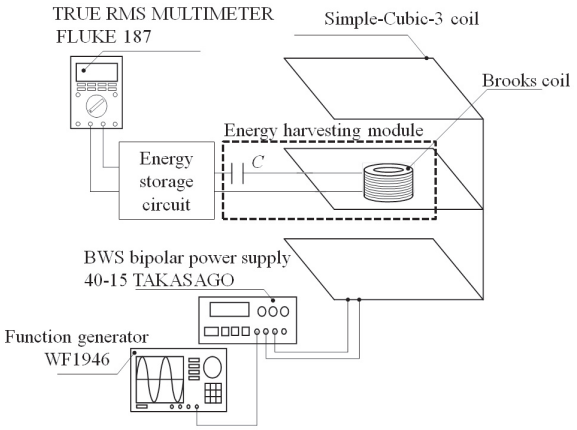


Fig. 6　Experimental setup.

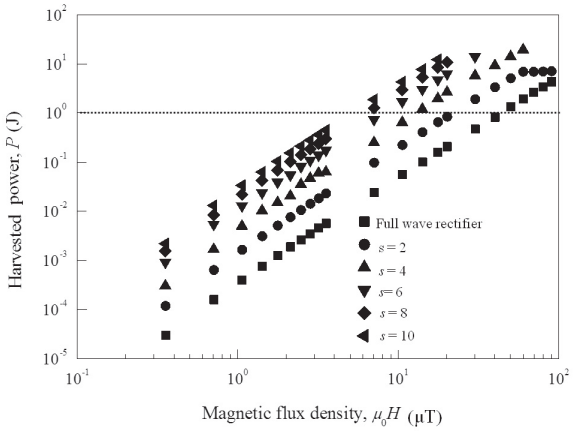


Fig. 7　Comparison of the efficiency as a function of magnetic field, as a parameter of the number of steps.

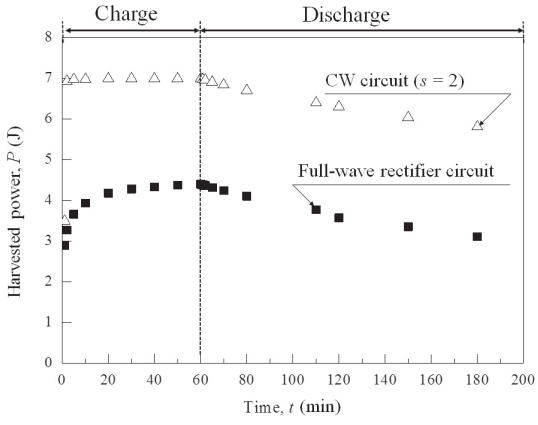


Fig. 8　The harvested power as a function of time. The storage circuits were Full-wave rectifier circuit and CW circuit (s = 2).

4 実験結果

4.1 蓄電回路

印加磁界に対する回収電力量を Fig. 7 に示した。全波整流回路で得られる電力量と比較し，CW 回路を用いることで約 *s* の 2 乗に比例した電力量が得られた。60 μT 以上の磁界印加時，2 段 CW 回路のみ出力電圧が 37 V 程度で飽和した。CW 回路内のダイオードは，V_{in} の正負に応じで相互にオン・オフ動作を繰り返す。オフ時のダイオード逆方向電圧は，2 段 CW 回路では V_{out} に相当し，段数が倍になると半減する。1N5818 の最大逆方向電圧の公称値は 30 V であり，使用したダイオードが正常なオフ動作をしなくなったためだと考察した。

Fig. 8 に 60 Hz，90 μT の一様磁界を用いた充放電特性の比較を示した。前述の通り、2 段 CW 回路の蓄電量は 60 μT と同じ程度で飽和したが，昇圧を含まない全波整流回路に比べ 1.6 倍程度の蓄電量に相当した。蓄電量が一定と判断した時間を充電時間とし，充電特性を評価した。一様磁界発生停止時と停止 2 時間後の蓄電量を比較し，放電特性を評価した。充電時間は，全波整流回路の 60 分と比較し，2 段 CW 回路では 2 分と短かった。減少した蓄電量は，全波整流回路で 40.7 %，2 段 CW 回路で 20.1 %となった。以上の充放電特性の比較から，蓄電回路における CW 回路の優位性を確認することができた。

Fig. 9 に 1 J を蓄電するために必要な磁束密度，蓄電時間，CW 回路の段数の関係をまとめた。なお，全波整流回路による結果についても，図中 Full wave(*s* =1) として比較のため記載した。CW 回路の段数を増やすごとに磁束密度は小さくなったが蓄電時間の増加傾向が見られた。さらに 6 段以上用いることで 10 μT 以下でも 1 J を蓄電できることが分かった。Table 4 に 1 mJ, 1 J の蓄電に必要な時間，磁束密度を示した。1 mJ の電力量であれば，数百 nT オーダーの環境磁界から蓄電が行えることを確認した。

4.2 環境磁界発電装置

Fig. 10 に LED で構成された過電圧制限回路を接続した時の磁界強度に対する出力電圧 V_{out} (V)を示した。どちらの蓄電回路を用いた場合でも，電圧制限回路により V_{out} を 18 V 程度に制限された。つまり，過電圧制限回路により，蓄電キャパシタの耐電圧，降圧 DC-DC コンバータの最大入力電圧，および CW 回路用ダイオ

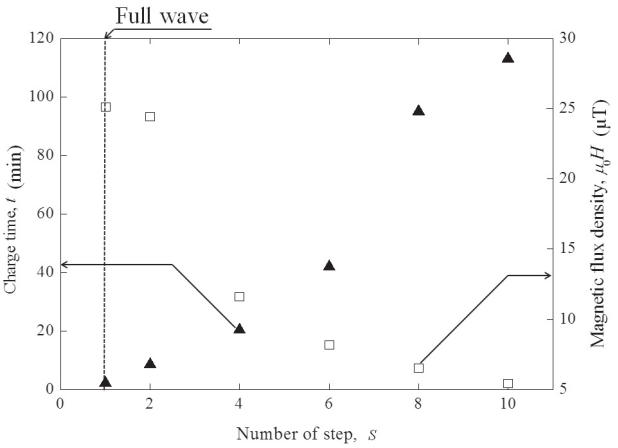


Fig. 9　Required of charge time and magnetic flux density for harvesting 1 J as a function of number of step.

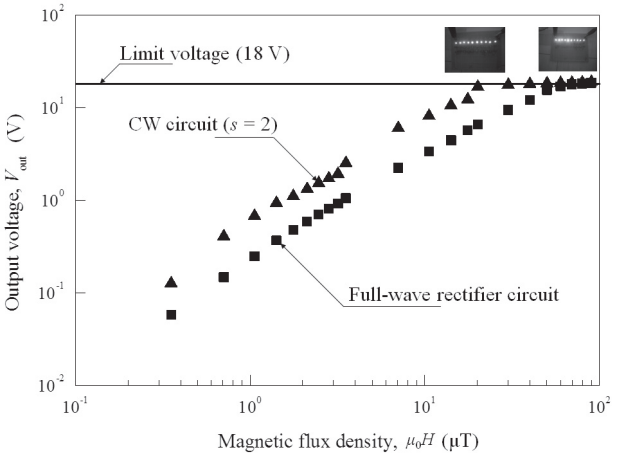


Fig. 10　The limited output voltage as a function of magnetic flux density.

Table 4　Required of magnetic flux density and charge time for 1 mJ and a 1 J by using air core coil as a function of magnetic field, as a parameter of the number of steps.

	P = 1 mJ		*P* = 1 J	
	B (μT)	*t* (min)	*B* (μT)	*t* (min)
Full-wave	1.54	6.02	45.1	2.17
2	0.929	6.60	24.4	8.36
4	0.598	17.3	11.6	20.2
6	0.370	97.3	8.19	42.0
8	0.300	121	6.52	95.4
10	0.268	158	5.43	117

ード最大順方向電圧以下で装置を動作することに成功した。また，2 段 CW 回路を用いた場合，20 μT 程度から LED の点灯が始まり，磁界の大きさとともに LED の光が強くなっていった。つまり本装置は，ICNIRP2010 ガイドライン値の 1/10 となる環境磁界の存在を，回収した電力のみで LED の点灯として視覚的に通知・警告することに成功した。

最後に回収した電力量の利用効率について調査した。環境磁界発電装置が蓄電した 1 J の電力量に対し，疑似負荷 1 kΩ に 3.3 V 出力された時間は 62 s であった。蓄電した 1 J をすべて利用可能であれば，この時間は 77 s となる。つまり，蓄電された電力量の 8 割となる 800 mJ が使えたことを実証した。

5 結言

本論文では，環境磁界発電を用いた蓄電回路の検討を行った。以下に得られた結果を示した。

(1) 全波整流回路と比較し，蓄電回路における CW 回路の優位性を確認した。CW 回路を用いることにより全波整流回路と比較し段数 s 倍程度の出力電圧が得られることを確認した。

(2) CW 回路の段数をパラメータとし，1 J の蓄電に必要な環境磁界の大きさと所要時間を調査した。段数が 6 段以上であれば，10 μT 以下の磁界からも 1 J の蓄電が行えることを確認した。

(3) 環境磁界発電装置を試作し，過電圧制限回路の評価を行った。蓄電キャパシタの耐電圧，降圧 DC-DC コンバータの最大入力電圧，および CW 回路用ダイオード最大順方向電圧以下で装置を動作することに成功した。

(4) LED を用いた過電圧制限回路により，ICNIRP2010 ガイドライン値の 1/10 となる環境磁界の存在を，回収した電力のみで LED の点灯として視覚的に通知・警告することに成功した。

(5) 環境磁界発電装置が蓄電した 1 J の電力量を，疑似負荷 1 kΩ に対し，62 s の間 3.3 V 定電圧出力することに成功した。本装置が回収した電力量の 80%を負荷に供給できることを実証した。

(2012 年 9 月 28 日受付，2013 年 3 月 29 日再受付)

謝辞

この研究の一部は平成 22～23 年度科学研究費補助金（若手研究(B)，課題番号 22760206）の補助を受けて行われた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

[1] K. Tashiro, H. Wakiwaka, S. Inoue, Y. Uchiyama, Energy Harvesting of Magnetic Power-Line Noise," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, pp. 4441-4444, 2011.

[2] 田代晋久，脇若弘之，内山悠，商用周波数磁界を用いた体内へのエネルギー伝送に関する考察，電気学会リニアドライブ研究会資料,LD-11-069, pp. 13-16, 2011.

[3] K. Tashiro, H. Wakiwaka, Y. Uchiyama, Loss measurement in power conditioning module for power-line magnetic noise energy harvesting device, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012.

[4] ICNIRP : Guideline for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz), Health phys, 99(6), pp. 818-836, 2010.

[5] 内山　悠，田代　晋久，脇若　弘之，商用周波数磁気ノイズ電力回収装置の試作，平成２３年度電気学会産業応用部門大会，Y-41, 2011.

[6] C. To-yon, H. sasaki, and T. ritsu, Energy harvesting technology, *Measurement and control,* vol. 48, pp. 579-586, Jul. 2009.

[7] A. Harb, "Energy harvesting:State-of-the-art," Renewable Energy, 36,pp. 2641-2654, 2011.

[8] K. Tashiro, H. Wakiwaka, and Y. Uchiyama, Optimization of AC-DC converter for magnetic energy harvesting device, 2012 Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST), pp. 89-92, 2012.

[9] R.J.M Vuller, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, R. Merten, Micropower energy harvesting, Solid-State Electronics, 53, pp.684-694, 2009.

[10] J.G.Rocha, L.M. Goncalves, P.F. Rocha, M.P. Silva, S. Lanceros-Mendez, Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.57, pp.813-819, 2010.

[11] LTC3588 data sheet, Linear Technology, 2010.

[12] A. Matsuoka, K. Matsumura, A. Kubota, K. Tashiro, and H. Wakiwaka, Residual magnetization measurements of a motor to be used in satellites, Proc. of SPIE, vol. 7500, pp. 750012-1 - 750012-6, 2009.

[13] K. Tashiro, A. Matsuoka, and H. Wakiwaka, Simple-Box-9 coil system: A novel approach to design of a square coil system for producing uniform magnetic fields, Materials Science Forum, vol. 670, pp. 275-283, 2011.