

学術論文

商用周波数磁気ノイズを積極的に回収する エナジーハーベスティング用空心コイルの開発

Development of air-core coils for energy harvesting of magnetic noise focused on commercial frequency

井上 伸一朗^{*1}, 内山 悠^{*1},
田代 晋久^{*1}(正員), 脇若 弘之^{*1}(正員)

Shin-ichiro Inoue, Yu Uchiyama,
Kunihisa Tashiro(Mem.), Hiroyuki Wakiwaka(Mem.)

This paper presents a design of air-core coil for energy harvesting of magnetic noise focused on commercial frequency. We prepare four Brooks coils as parameters of size and spacing factor. The developed energy harvesting element is serial RLC circuit. It is composed by the Brooks coil, matching capacitor and matching load. From the experimental results, we successfully demonstrate the energy harvesting of 1 mW power from a magnetic field of 60 Hz, and the required flux density is less 25 \cdot T. Consideration of the optimum design for the element is also discussed.

Keywords: Energy harvesting, Magnetic noise, Brooks coil.

1 はじめに

1997 年 12 月に京都で開催された気候変動枠組条約第 3 回締約国会議で議決された京都議定書では、1990 年を基準として温室効果ガスの削減率を定め、先進国は 2008 年から 2012 年の期間で 5 % 以上削減しなければならないと定めた。そのため、CO₂ を排出しない新たなエネルギー源に注目が集まっている。CO₂ およびエネルギー量削減には、大量のエネルギーを消費する人間の生活習慣も改善する必要がある。「もったいない」という言葉を生み出した日本も例外ではない。高度経済成長により電化製品に依存した生活を送る我々にとって、個人の心がけだけで実現できる省エネ活動は限定される。

こうした背景の中、廃熱や振動を再利用可能なエネルギーに変えるエナジーハーベスティング技術(Energy harvesting technology)の研究が盛んに行われるようになって来た[1-3]。ドイツ EnOcean GmbH とオーストリア Sensor Dynamics AG も同様な機能を備えた IC の出荷を発表し、ビル管理向けセンサのエネルギー回収技術仕様を業界標準にするための団体「EnOcean Alliance」を米国拠点に結成している。再利用可能なエ

ネルギーを用いることで、建物全体のヒトの安全だけでなく、エネルギーの浪費を検出しながら削減することに注目した試みが始まっている。また、2008 年 11 月にアメリカ TI 社(Texas Instruments)が発表した MSP430 シリーズは、エネルギー回収技術で給電することを想定した無線トランシーバ機能付きマイコン用 IC であり、電池交換を必要としないユビキタスセンサネットワークの構築が行える[4]。

2010 年 7 月に開催された能率協会主催の Techno-Frontier 2010 において、エナジーハーベスティングのみに特化した第一回環境発電開発者会議が日本にて開催された。振動、熱、および光・電磁波発電における実用化に近い技術が紹介された。光発電には主に結晶 Si 系を用いることでモジュール効率は約 15% 程度となっている。近年では有機系の色素増感型の研究が行われており、低コストでさらに室内環境での発電を可能としている。振動型発電ではエネルギーの取り出す手法が幾つかあり、電磁誘導を用いたもの、圧電を用いたもの、静電誘導を用いたものがある。近年ではパワーMEMS を用いた静電利用のエレクトレット発電がある。現在オムロンでは発電量 100 μ W、三洋電機では入力信号が 2 Hz、0.4 G 時では 40 μ W の発電デバイスが発表されている。熱電型発電は温度差を電位差に変換するものである。信頼性が高く、小型化しても効率は下がらない特徴がある。現在は性能指数 Z が高い材

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

料の開発が行われている。

一方、著者らは地磁気の百万分の一程度の微弱な低周波磁界を検出する生体磁気計測を目指した高性能磁気シールドと、SQUID センサと同程度の感度を有する高感度磁気センサの研究を行ってきた。どれだけ高性能な磁気シールドを製作しても商業周波数の磁気ノイズを完全に除去できていない。我々の生活環境下であれば送電線や家庭内配線に囲まれており、こうした磁気ノイズは昼夜問わず存在する。つまり、電化製品に供給すべき電気エネルギーの一部が、我々の生活環境下に再生可能な磁気エネルギーとして提供されていると見ることができる。

エナジーハーベスティング技術で用いられるエネルギー回収素子は環境に応じて用途を使い分ける必要がある[1~3]。光発電、振動型発電、熱電型発電はそれぞれ時間や場所、温度による制約を受ける。つまり光、振動および温度差を利用できない環境では、こうしたエネルギー回収素子は向かない。また、一般的な電磁誘導方式を用いる場合、ファラデーの電磁誘導の法則よりコイルに誘起される電圧は周波数に比例する。そのため、周波数が 50 あるいは 60 Hz である商用周波数磁気ノイズをエネルギー源として注目した例は著者らの知る限り報告されていない。

本論文では、我々の生活環境下で常に存在する商用周波数磁気ノイズをエネルギー源として注目し、エナジーハーベスティング用空心コイルの開発を行った。ユビキタスセンサネットワーク用の電源として利用可能な 1 mW 以上の電力を回収するための条件を明らかにすることを目的とした。空心コイルの形状は、与えられた導線長さで最大のインダクタンスを実現できる Brooks コイルに注目した。コイルサイズ、占積率の 2 つをパラメータとし、4 種類の空心コイルを用いて、それぞれ 60 Hz で最大電力が回収できるように共振回路を製作した。印加する一様磁界の周波数と振幅をパラメータとし、1 mW 以上の商用周波数磁気ノイズを積極的に回収できる条件を調査した。商用周波数磁気ノイズを積極的に回収するエネルギー回収素子として、コイルサイズが大きく占積率が高い空心コイルが有利であることを確認した。外径 28 cm、占積率 0.938 のコイルの場合、地磁気の大きさ以下となる 25 μ T 程度の振幅があれば 1 mW の電力を回収できる能力があることを確認した。得られた結果より、エナジーハーベスティング素子の Q 値に注目し、空心コイルの設計指針を検討した。

2 実験方法

コイルを用いて商用周波数磁気ノイズを積極的に回収するため、Fig. 1 のような RLC 直列共振回路をエネルギー回収素子として採用した。 R [Ω]および L [H] は空心コイルの抵抗および自己インダクタンスである。 V [V]はファラデーの法則およびテブナンの定理より、平均半径 a [m]、巻数 n の空心コイルに総磁束 Φ [Wb] が鎖交した時の両端電圧として記述できる。コイルに鎖交する平均磁束密度を B [T]、周波数を f [Hz]および虚数を j とすると、次式で記述できる[5]。

$$V = d\Phi / dt = j2\pi^2 f n a^2 B \quad [V] \quad (1)$$

C は商用周波数に共振周波数を一致させるためのコンデンサ、 r_0 [Ω]は負荷を模擬した抵抗であり最大電力供給の定理より R と同じ値が理想である。上記の要請から、著者らは高感度インダクション磁気センサの開発で実績のある Brooks コイルを空心コイルに採用した。Brooks コイルは正方断面を有する円形コイルであり、コイル幅、内径、外径の比が 1:2:4 となる形状を有する。先行研究より、同じ寸法・占積率であれば巻数によらず R/L で与えられる時定数が一定となり、製作時の寸法誤差がインダクタンスの推定値に与える影響が極めて小さいという実用上有利な点がある [6]。Brooks コイルの平均半径を a [m]、巻数を n 、導線の断面積を s [m^2]、導線の体積抵抗率を ρ [Ωm]とすると、 L および R は次式で推定できる。

$$L = 1.6994 \times 10^{-6} a n^2 \quad [H] \quad (2)$$

$$R = 2\pi a n \rho / s \quad [\Omega] \quad (3)$$

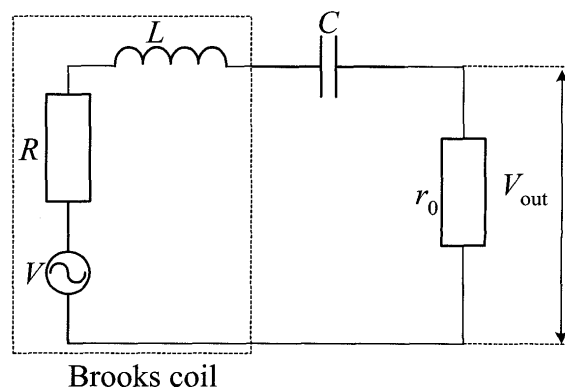


Fig. 1 Equivalent circuit of the energy harvesting element.

Table 1 Specifications of energy harvesting elements.

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
(Coil parameters)				
Coil width, c [mm]	50	70	50	70
Diameter of wire, δ [mm]	0.5	0.5	0.5	0.5
Spacing factor, β	0.850	0.938	0.108	0.107
Number of turns, n	8500	18395	1080	2104
Inductance, L [H]	9.20	60.3	0.150	0.789
Resistance, R [Ω]	350	1060	44.7	121
Cutoff frequency, f_c [Hz]	6.0	2.8	50	24
(Energy harvesting element)				
Resonance frequency f_0 [Hz]	60	60	60	60
Matching load, r_0 [Ω]	320	1000	45	120
Matching Capacitor, C [μ F]	0.7	0.11	47	8.6
Quality factor, $Q=2\pi f_0 L/(2R) = \pi f_0 L/R$	5	11	0.63	1.22
Half band width, f_0/Q [Hz]	12	5.5	95	49

Fig. 2 および Table1 に今回評価を行った空心コイルとその仕様を示す。寸法および占積率の2つのパラメータが異なる4種の空心コイル (Coil1~4) を用いた[7]。Brooks コイルの形状は前述の通り4つの寸法パラメータ (コイル幅・内径・外径・平均半径) のうちどれか一つを決定すると、他の3つのパラメータが一意に決まる。今回はコイル幅が 50 mm および 70 mm の2通りを評価した。占積率はそれぞれの寸法で疎巻・密巻となる2通りを製作した。コイル幅 50 mm のコイルは非磁性ボビンを用い、コイル幅 70 mm のコイルは占積率向上に有利なボビンレスとして製作した。それぞれ R および L の推定値と実測値の誤差は 3 % 以下で一致した。実験に用いた共振用コンデンサ C および負荷抵抗 r_0 は理論値に近いものを選択して使用した。

Fig. 3 に一様磁界発生用の Simple-Cubic-3 コイルシステム[8] (以降 SC3) を示す。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。これを直交方向に3つ組み合わせた構造となっているため、3 軸方向への磁界印加が行える。著者らは本システムを用いて地磁気的全磁力を 100 nT 以下に低減し、宇宙用モータの残留磁気計測を行った実績がある[9]。今回は床面に対して垂直方向に磁界を発生し、空心コイルをコイルシステムの中心平面 (床 上 1 m) に設置した木製台の上に設置した。Fig. 4 に中心平面に発生する磁界一様性をビオサバールの法則を用いて計算した結果を示す。一辺 1 m の正方形領域内に中心と偏差 1 % 以下の一様磁界が発生できる。今回評価した空心コイルの直径は 30 cm

以下であるため、ほぼ理想的な一様磁界に対するエネルギー回収性能を評価できる。

今回製作したエネルギー回収素子の周波数選択性および回収可能エネルギーを確認するため、印加磁界に対するエネルギー回収素子の擬似負荷の両端電圧の周波数特性および振幅特性を測定した。周波数特性は、印加磁界の振幅を 1 μ T および 10 μ T の2通りで行い、周波数を 1 Hz から 1 kHz まで変化させた。振幅特性は周波数を商用周波数の 60 Hz とし、振幅を 1 μ T から地磁気レベルの振幅となる 60 μ T まで変化させた。擬似負荷の両端電圧は FFT アナライザーを用いて計測し、得られた電圧の実効値と既知の擬似負荷の抵抗値から電力を算出し、エネルギー回収能力を考察した。

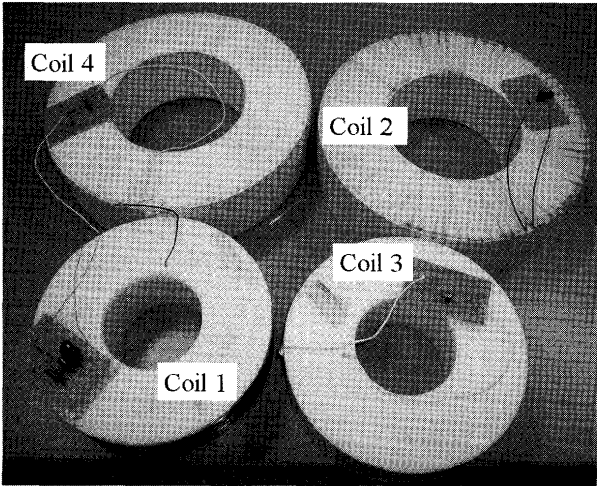


Fig. 2 Our developed energy harvesting elements with air-core Brooks coils.

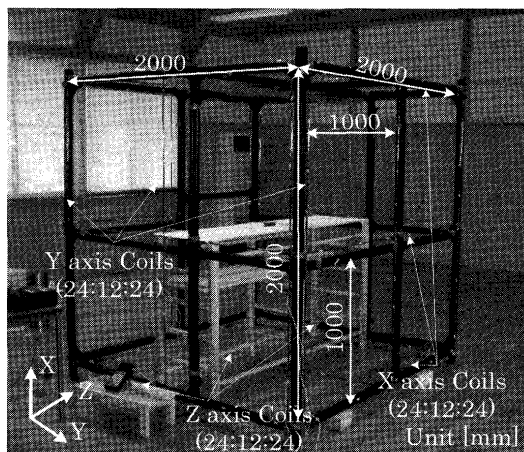


Fig. 3 Simple-Cubic-3 coil system.

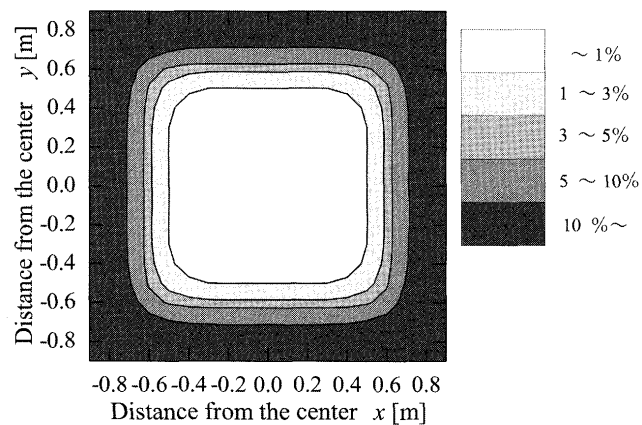
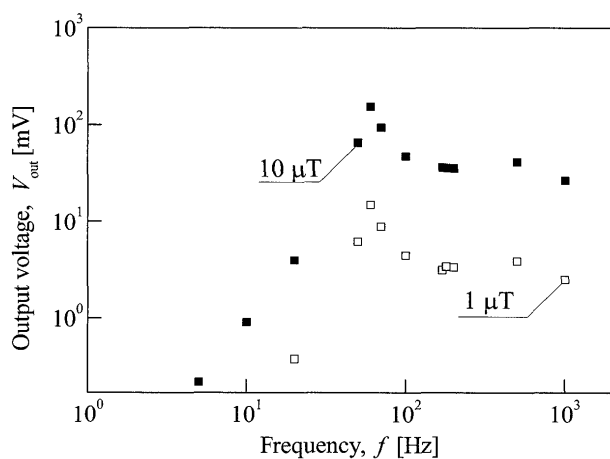
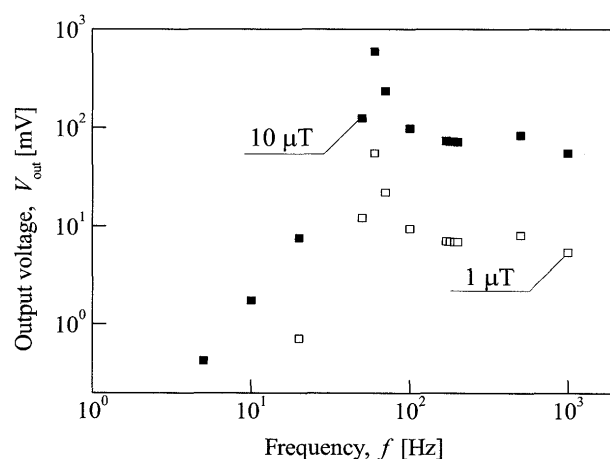


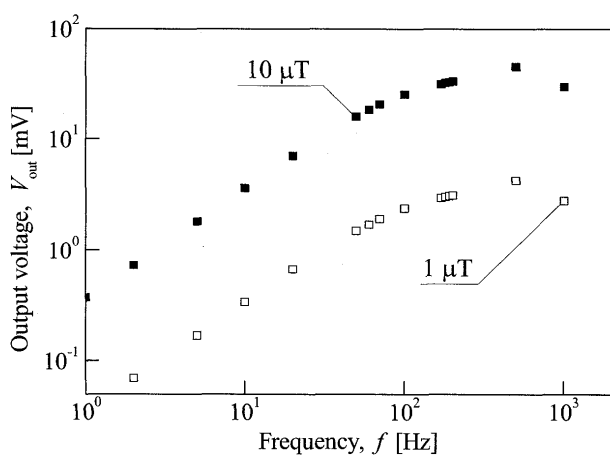
Fig. 4 Magnetic field distribution on the center plane of the system.



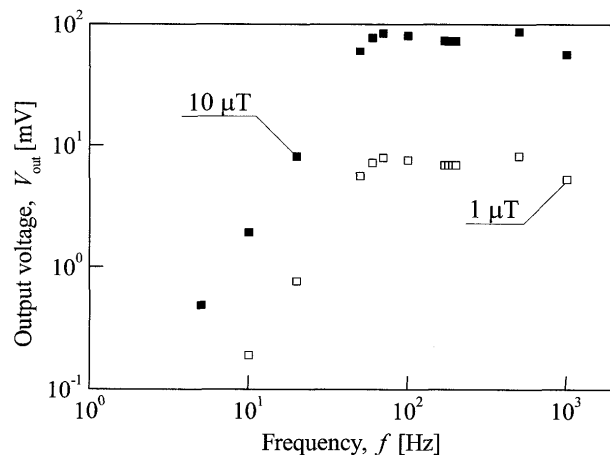
(a) Coil 1



(b) Coil 2



(c) Coil 3



(d) Coil 4

Fig. 5 Output voltage of energy harvesting elements as a function of frequency, as a parameter of magnetic flux density. The uniform magnetic field was generated by SC3 coil system.

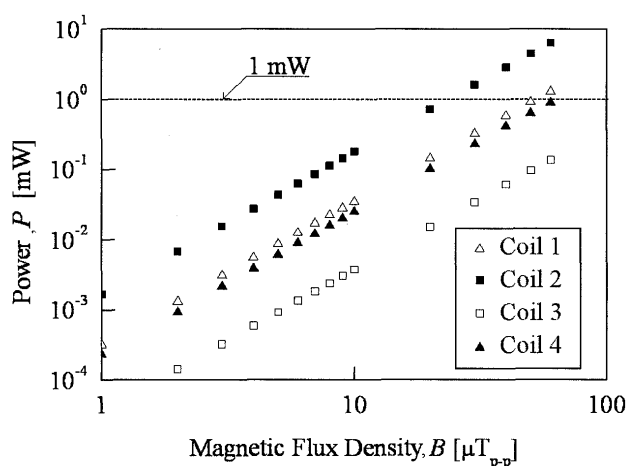


Fig. 6 Harvested power as a function of magnetic flux density, as a parameter of number of elements.

Table 2 Summarized ability of energy harvesting elements.

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
$P_{1\mu T} [\mu W]$	0.35	1.57	0.03	0.22
$B_{1mW} [\mu T]$	53	24.2	166	65.7

3 実験結果

Fig. 5 にエネルギー回収素子の周波数特性を示す。横軸は印加磁界の周波数、縦軸は評価したエネルギー回収素子の擬似負荷における両端電圧を示す。占積率の高い Coil1, Coil2 を用いたエネルギー回収素子では、商用周波数付近の 60 Hz において共振現象が確認でき、10 μT の印加磁界に対して 100 mV 以上の電圧が得られた。一方、占積率の小さな Coil3, Coil4 ではこうした共振現象を確認することができず、10 μT の印加磁界に対して 10 mV オーダの両端電圧となった。Table1 に示した通り、これらの素子の Q 値は 1 以下と小さく、半値幅が 20 Hz 以上となる。

Fig. 6 にエネルギー回収素子の振幅特性を示す。横軸は印加磁界の振幅、縦軸は評価したエネルギー回収素子の擬似負荷における両端電圧から算出した回収可能電力を示す。また、Table 2 に商用周波数 60 Hz の磁束密度 1 μT に対する回収可能な電力 $P_{1\mu T} [\mu W]$ 、および商用周波数 60 Hz から 1 mW を回収するのに必要な磁束密度 $B_{1mW} [\mu T]$ を表にまとめた。全てのエネルギー回収素子において、擬似負荷の両端電圧は印加磁界に

比例し、空心コイルが回収できるエネルギーは印加磁界の振幅の 2 乗に比例することを確認した。本結果から、1 mW の電力回収に必要な商用周波数磁気ノイズの振幅は、Coil 1 で 53.0 μT_{pp} 、Coil 2 で 24.2 μT_{pp} 、Coil 3 で 166 μT_{pp} 、Coil 4 で 65.7 μT_{pp} と試算された。

4 考察

現在、極めて低電圧で昇圧可能な環境発電向けの電力変換／エネルギー管理用 DC-DC コンバータが実用化されている[10]。現段階では、エネルギー回収素子の出力電圧は最低でも ± 30 mV 必要となるため、明確な共振現象を確認できない Coil 3, 4 では不十分であると考えられる。

空心コイルと擬似負荷を接続した RL 回路のカットオフ周波数は、空心コイルのみのカットオフ周波数 f_c の 2 倍となる。RL 回路のカットオフ周波数 $2f_c$ が商用周波数以上の値であると、 Q 値が 1 以下となり対応する半値幅が広がったためと結論できる。式(2)および(3)のみから空心コイルの f_c を考察すると、導線断面積を小さく巻数を多くすることで容易に下げることができると誤解してしまう。実際はコイルの断面積が決まっているため導線断面積を決めると実現可能な巻数には限界があり、カットオフ周波数は制限される。Brooks コイルの特徴として、達成可能な占積率が決まれば空心コイルのカットオフ周波数は寸法のみで決定できる点にある。上記の考察より、 Q 値と f_c の関係は次式で導出できる。

$$f_c = f_0 / (2Q) \text{ [Hz]} \quad (4)$$

商用周波数 60 Hz の $\pm 10\%$ 以内の磁気ノイズを半値幅の範囲内で積極的に回収する条件を考えると、必要な Q 値は 5 以上となる。この条件を満足するために必要な空芯コイルのカットオフ周波数 f_c は、式(4)より商用周波数 f_0 の 10 分の 1 以下に設計する必要がある。前報の結果より、 f_c は空心コイルのコイル幅（コイル外径の 1/4）、占積率、および導線の抵抗率のみの関数で記述することができる[11]。導線の抵抗率を室温における銅の抵抗率、占積率を 0.9 と仮定した場合、導出されるコイル外径は、50 Hz に対して 21.1 cm、60 Hz に対して 19.3 cm 以上の空心コイルを製作する必要がある。他の形状の空心コイルを用いる場合、さらに大きなコイル外径が必要となる。

5 結言

本論文では、我々の生活環境下で常に存在する商用周波数磁気ノイズをエネルギー源として注目し、エナジーハーベスティング用空心コイルの開発を行った。ユビキタスセンサネットワーク用の電源として利用可能な 1 mW 以上の電力を回収するための条件を明らかにすることを目的とした。以下に得られた結果を箇条書きする。

- (1) コイルサイズ、占積率の 2 つをパラメータとし、4 種類の空心コイルを用いて、それぞれ 60 Hz で最大電力が回収できるように共振回路を製作し、エネルギー回収素子としての性能を評価した。
- (2) 空心コイルの外径および占積率の大きさがエネルギー回収素子に求められることが判明した。
- (3) 今回評価した中で最もエネルギー回収能力に優れた空心コイルは外径 28 cm, 占積率 0.938 であった。地磁気以下となる 25 μ T 程度の振幅があれば 1 mW の電力を回収できる能力があることを確認した。
- (4) 商用周波数 60 Hz の $\pm 10\%$ 以内の磁気ノイズを半振幅の範囲内で積極的に回収する条件を考えると、必要な Q 値は 5 以上となる。そのためには、コイルのカットオフ周波数を商用周波数 f_0 の 10 分の 1 以下に設計する必要があるという所見が得られた。
- (5) 商用周波数 50 Hz/60 Hz に対し、空心コイルの Q 値が 5 以上となる空心 Brooks コイルの外径は 20 cm 以上必要であるという推定結果が得られた。

今回評価を行った空心コイルは寸法・重量が比較的大きいため、人が携帯するようなエネルギー回収素子としては向かない。式(1)より、コイルの半径 a を小さくし同等の誘起電圧を得るためには、磁性コアを用いて周囲の磁束を集め、コイルに鎖交する磁束密度 B を上げる手法が考えられる。この際、微弱磁界に対する磁性体の透磁率および磁性体の形状による反磁界を考慮し、実効的な透磁率を確保する必要がある。一方、空心コイルを用いた場合、磁性体の飽和や非線形性等の影響が無く、磁界強度に対して優れた線形性を有する利点を持つ。磁界強度に対して線形性を有さない場合、磁界強度に合わせた共振用コンデンサを選定する必要がある。

ICNIRP(国際非電離放射線防護委員会)は時間的に変化するヒトの磁界曝露に関する参考レベルを示している[12]。職業的曝露は 25/f [μ T] (0.025~0.82 kHz)、公衆の曝露は 5/f [μ T] (0.025~0.8 kHz)となっておりそれぞ

れ 60 Hz では 416 μ T, 83 μ T に対応する。今回開発したエネルギー素子は、25 μ T 程度の振幅があれば 1 mW の電力を回収できる能力があるため、こうした低周波磁気環境の警告用としての用途が考えられる。

謝辞

この研究の一部は平成 22 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。

(2010 年 9 月 24 日受付, 2011 年 2 月 24 日再受付)

参考文献

- [1] 野澤哲生, 廃熱や振動から発電するエネルギー回収技術が実用期に, Green Device Magazine 2009 Summer, pp. 76-81, 2009
- [2] 小紫公也他, 特集ワイヤレスエネルギー伝送技術, 電学誌, 129, 7, pp. 410-429, 2009.
- [3] 沈東演, 佐々木宏, 鄭立, エネルギーハーベスト技術, 計測と制御, 48, 7, pp. 579-586, 2009.
- [4] MSP430TM 超低消費電力マイコンカタログ, Texas Instruments, 2010.
- [5] 田代晋久, 垣内厚弥, 森泉健一, 脇若弘之, インダクション磁気センサの動作原理に関する一考察, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-09-32, 2009.
- [6] F. W. Grover, *Inductance Calculations*, Dover Phoenix Editions, 2004.
- [7] K. Tashiro, H. Wakiwaka, A. Kakiuchi, and A. Matsuoka, Comparative study of air-core coil design for induction magnetometer with current-to-voltage converter, Proc. of second international conference on sensing technology (ICST2007), pp. 590-594, 2007.
- [8] K. Tashiro and H. Wakiwaka, Simple Cubic 3 coil, The Bioelectromagnetics society 29th annual meeting abstract collection, pp. 421-423, 2007.
- [9] 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
- [10] LTC3109 カタログ, Linear Technology, 2010.
- [11] K. Tashiro, Proposal of coil structure for air-core induction magnetometer, *Proc. IEEE Sensor 2006*, pp. 939-942, 2006.
- [12] 国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP), 時間変化する電界, 磁界及び電磁界による曝露を制限するためのガイドライン(300 GHz まで), 1998.