

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760206

研究課題名（和文）商用周波数磁気ノイズを積極的に回収するエネルギーハーベスティング装置の開発

研究課題名（英文）Development of magnetic energy harvesting device for power-line field

研究代表者

田代晋久（TASHIRO KUNIHISA）

信州大学・工学部・助教

研究者番号：50325487

研究成果の概要（和文）：

本研究は、我々の研究環境下に存在する商用周波数磁界を有効活用するため、エネルギーハーベスティング装置の開発を行いました。60 Hz の周波数で、地磁気程度となる 21.2 μT の磁界から 6.32 mW の電力回収に成功し、ワイヤレスセンサ駆動のデモンストレーションを行いました。

研究成果の概要（英文）：

Because power-lines are necessary for our modern life, we are required to coexist with undesirable magnetic power-line noise. The purpose of this study was to demonstrate the energy harvesting of power-line magnetic field. We demonstrated energy harvesting of 6.32 mW from a magnetic field of 21.2 μT at 60 Hz.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：磁気応用工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：エネルギーハーベスティング，環境磁界発電，商用周波数

1. 研究開始当初の背景

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。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

一回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。

本研究代表者は、低周波微弱磁界検出技術研究の過程で、商用周波数磁気ノイズに注目した。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。ICNIRP2010による生体へのガイドラインによると、商用周波数となる50 Hzあるいは60 Hzの低周波磁界では200 μ Tとされている。本研究では、我々の生活環境下に存在する商用周波数磁界を再生可能な磁気エネルギー源とみなし、エナジーハーベスティング用発電デバイスの開発を目的とした。

2. 研究の目的

(1) 空心コイルの開発

自作済みの空心コイルと整流回路を用いて高効率エネルギー回収に必要なコイルパラメータの条件導出、および1 mW以上の電力を回収するために必要な空心コイルの設計・開発

(2) 電力貯蔵安定化回路の開発

低損失電子回路素子の入手とともに、整流回路と蓄電キャパシタの構成パラメータの検討を通じた90%以上の効率を目標とした電力貯蔵安定化回路の設計・開発

(3) エネルギーハーベスティング装置の実装

空心コイルと電力貯蔵安定化回路を一体化し、共振点を電源周波数にチューニングした1 mW以上の電力を供給可能なエネルギー回収装置の設計・開発

(4) 超低消費電力IC駆動のデモンストレーション

開発するエネルギーハーベスティング装置を用いた超低消費電力IC駆動のデモンストレーションを行うとともに、今後の展望と問題点を提起する。

3. 研究の方法

(1) 空心コイルの必要条件の導出

空心コイルの各種パラメータに対するエネルギー回収量を基に、エネルギー回収素子用空心コイルの検討を行う。実験による定量的評価と有限要素法解析による確認を通じて1 mW以上の電力を回収可能な空心コイルの必要条件を導き出す。

(2) 空心コイルの製作

導出した空心コイルの必要条件を基に、一次試作用コイルを製作・評価する。一次試作用コイルは研究室レベルで実績のある直径0.2 mm以上の導線で数種類の条件でそれぞれ十数個手巻きして製作し、実験より1 mW以上の電力を回収が可能なことを確認する。

(3) 電力貯蔵安定化回路の最適設計

空心コイルにて獲得できるエネルギーは、空心コイルと電力貯蔵安定化回路の整合性と、使用される素子における電力損失によって決まる。まず、回路シミュレータを用いて、回路素子のパラメータの違いによる効率改善法を探る。それと並行し、近年進歩が目覚ましいオン抵抗の小さなダイオードとスーパーキャパシタの情報収集および素子の入手を行う。90%以上の効率達成を目標に候補となる回路を複数試作し、実験を通じて実証を行う。

(4) エネルギーハーベスティング装置の実装

エネルギーハーベスティング技術開発者向けの最新電力貯蔵モジュールの情報を収集し、その中の幾つかを入手し評価する。最新電力貯蔵モジュールと一体化し、エネルギーハーベスティング装置の実装を行う。1 mW以上の電力を供給可能な条件を確認する。

(5) 超低消費電力IC駆動のデモンストレーション

間欠駆動を基本とした超低消費電力ICへ安定に電力を供給するための疑似回路を試作し、通常の研究室環境下における動作確認を行う。開発したエネルギー回収素子を用いて、超低消費電力IC駆動のデモンストレーションを行い、今後の展望と問題点を提起する。本研究の成果について学会発表を通じた情報発信を行うことで本研究を総括する。

4. 研究成果

(1) 空心コイルの必要条件の導出

空心コイルの各種パラメータに対するエネルギー回収量を基に、エネルギー回収素子用空心コイルの検討を行った。空芯Brooksコイルでは地磁気程度の振幅を有する商用周波数磁気ノイズから1 mW以上の電力が回収される設計パラメータを導出した。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以上となることを明らかにした。直径0.5 mm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、必要となるコイル外径は、50 Hzに対して21.1 cm、60 Hzに対して19.3 cm以上と導出された。

また、コイル形状を空芯Brooksコイルに限定し、目標の回収エネルギーに対する必要なコイル直径の設計法を確立した。コイル占積

率が同じ場合、受電電力は導線の巻数および断面積によらず、コイル直径により決定されることを見出した。

図1に、コイル直径と回収可能電力の推定値を示す。60 Hzにおける ICNIRP2010 ガイドライン値 $200 \mu\text{T}$ の場合、80 mm 以上の直径が必要であることを見出した。また、回収電力はコイル直径の5乗に比例することを見出した。ICNIRP2010 において同じガイドライン値 $200 \mu\text{T}$ である上限周波数 400 Hz の場合、1 mW, 10 mW および 100 mW の受電電力には、それぞれ 40 mm, 60 mm, 100 mm 以上の空心コイルが必要であると推定された。

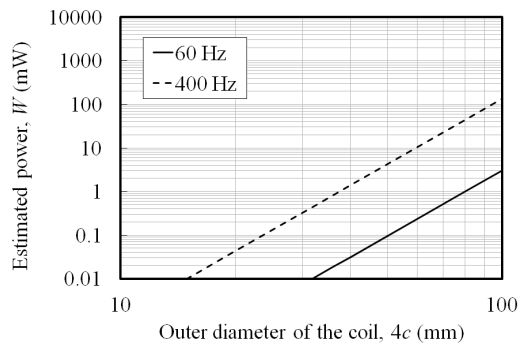


図1 コイル直径に対する受電電力

(2) 空心コイルの製作

設計を基に4つの空心 Brooks コイルを製作し、エネルギー回収モジュールとしての評価を行った。空心コイルが回収できるエネルギーは印加磁界振幅の2乗に比例した。その結果、最も性能の良いもので $21.2 \mu\text{T}$ の商用周波数磁界に対し 6.32 mW (擬似負荷での電力換算) のエネルギー回収に成功した。コイルの平均直径とQ値が大きいほど、電力回収に有利であるという実験結果は、設計で得られた知見に一致した。

図2に環境磁界を模擬するための3軸一様磁界発生コイルシステム、図3に開発したエネルギー回収モジュール、図4に磁界振幅に対する受電電力の実測値と理論値の比較を示す。90 μT における受電電力の実測値は 104 mW, 理論値は 106 mW となり良い一致が得られた。

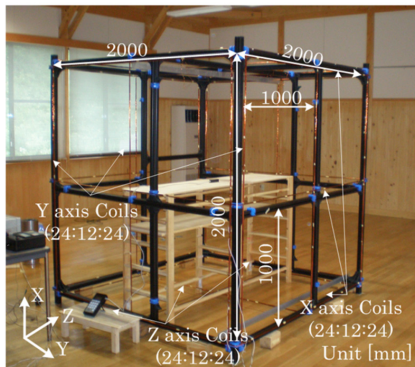


図2 3軸一様磁界発生コイルシステム

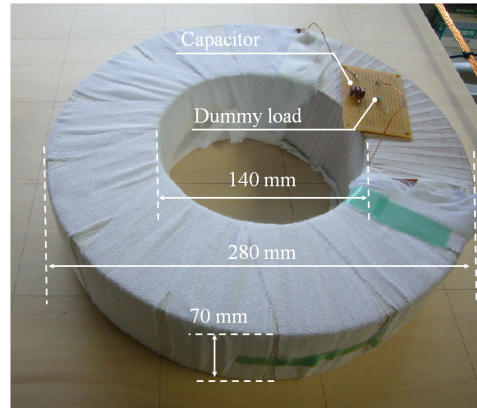


図3 エネルギー回収モジュール

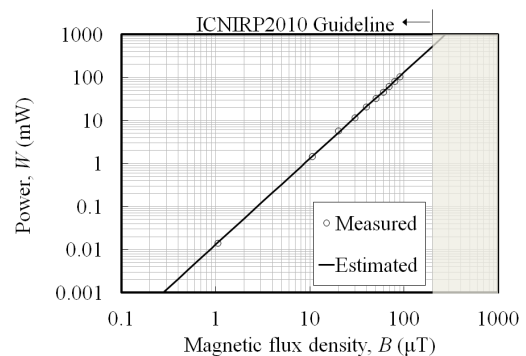


図4 磁界振幅に対する受電電力

(3) 電力貯蔵安定化回路の最適設計

エネルギー回収モジュールと整流回路の構成法を検討した。市販のオン抵抗の小さなショットキーダイオードを複数購入し、全波整流回路を製作した。エネルギー回収モジュールと組み合わせ、効率を評価した。最も良い素子を選定した場合、利用可能な磁界振幅が $24.7 \mu\text{T}$ 以上の場合、80%以上の電力回収効率を得られた。磁界振幅が $10 \mu\text{T}$ 以下の場合、モジュールの構成を並列共振回路とすることを提案した。図5にモジュールの構成法の違いによる整流回路の効率比較を示す。従来型の直列共振回路と比較し最大 30%程度の電力回収効率向上が得られた。

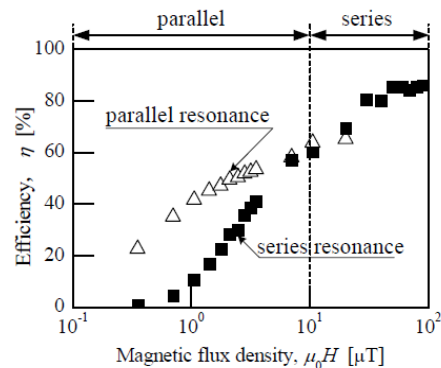


図5 整流回路の効率

(4) エネルギーハーベスティング装置の実装

エネルギーハーベスティング技術開発者向けの最新電力貯蔵モジュールの情報を収集し、その中の幾つかを入手し評価した。5 V 出力の環境発電用 DC-DC コンバータを組み合わせたエネルギーハーベスティング装置を製作した。図 6 に負荷をパラメータとした環境磁界に対する装置出力電圧の実測結果を示す。45.3 μT の磁界振幅で 5 V の DC 出力電圧を確認した。一方、装置に接続する負荷によって供給可能な電圧および電力が大きく異なった。この原因を、今回使用した DC-DC コンバータの効率であることを明らかにした。負荷抵抗 100 k Ω 、入力電圧 40 mV において最も良い効率が得られたが 30% が限界であった。

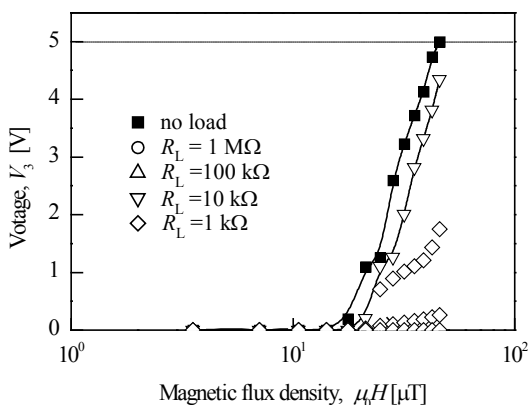


図 6 負荷をパラメータとした環境磁界に対する装置出力電圧

(5) 超低消費電力 IC 駆動のデモンストレーション

超低消費電力 IC (MSP430 eZ430-RF2500-SHE) を組み合わせた、無線通信デモを行った。60 Hz、21.2 μT の一様磁界から回収した電力を用いて、この IC を駆動させた。回収電力のみで、IC に内蔵された温度センサの情報をホストパソコンに送信するデモンストレーションに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

①田代晋久, 脇若弘之, “超低消費電力ワイヤレスセンサ用エネルギーハーベスティング技術の動向”, 平成 24 年電気学会全国大会講演論文集, 第 2 分冊, S2(29)-S2(32), 2012, 査読無

②内山悠, 田代晋久, 脇若弘之, “商用周波数磁界エネルギーハーベスティング用直列・並列共振回路の考察”, 平成 24 年電気学会全

国大会講演論文集

第 2 分冊, pp. 161-161, 2012, 査読無

③服部玄也, 田代晋久, 脇若弘之, “商用周波数磁界エネルギーハーベスティング用巻心材料の比較及び検討”, 平成 24 年電気学会全国大会講演論文集, 第 2 分冊, pp. 160-160, 2012, 査読無

④K. Tashiro, H. Wakiwaka, S. Inoue, and Y. Uchiyama, “Energy Harvesting of Magnetic Power-Line Noise”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, 4441-4444, 2011, 査読有,

DOI: 10.1109/TMAG.2011.2158190,

<https://soar-ir.shinshu-u.ac.jp/dspace/handle/10091/13270>

⑤井上伸一郎, 内山悠, 田代晋久, 脇若弘之, “商用周波数磁気ノイズを積極的に回収するエネルギーハーベスティング用空心コイルの開発”, 日本AEM学会誌, Vol.19, pp. 225-230, 2011, 査読有

⑥K. 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, 査読有,

DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.670.275

⑦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, 査読無

⑧K. Tashiro, H. Wakiwaka, Y. Uchiyama, “Loss Measurement in Power Conditioning Module for Power-Line Magnetic Noise Energy Harvesting Device”, Proc. of the 20th MAGDA Conference, pp. 303-308, 2011, 査読無

⑨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講演論文集, Y41-Y41, 2011, 査読無

⑩内山悠, 井上伸一郎, 田代晋久, 脇若弘之, “商用周波数磁気ノイズを回収するエネルギーハーベスティング用鉄心コアの考察, 「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 23, pp. 449-452, 2011, 査読無

[学会発表] (計 10 件)

①田代晋久, 脇若弘之, “超低消費電力ワイヤレスセンサ用エネルギーハーベスティング技術の動向”, 平成 24 年電気学会全国大会, 2012 Mar 21-23. (広島工業大学)

②内山悠, 田代晋久, 脇若弘之, “商用周

波数磁界エネルギーハーベスティング用直列・並列共振回路の考察”, 平成 24 年電気学会全国大会, 2012 Mar 21-23 . (広島工業大学)

③服部玄也, 田代晋久, 脇若弘之, “商用周波数磁界エネルギーハーベスティング用巻心材料の比較及び検討”, 平成 24 年電気学会全国大会, 2012 Mar 21-23 . (広島工業大学)

④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, 2011 Nov 24. (産総研臨海副都心センター)

⑤ K. Tashiro, H. Wakiwaka, Y. Uchiyama, “Loss Measurement in Power Conditioning Module for Power-Line Magnetic Noise Energy Harvesting Device”, The 20th MAGDA Conference, 2011 Nov 14-16 . (Garden Villa, Kaohsiung, Taiwan)

⑥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, 2011 Sep 9. (琉球大学)

⑦K. Tashiro, H. Wakiwaka and Y. Uchiyama, “Consideration of array module design for energy harvesting of power-line magnetic noise”, The Seventh Japanese - Mediterranean and Central European Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials (JAPMED’7), 2011 July 6-9. (Hotel Gellert, Budapest, Hungary)

⑧内山悠, 井上伸一郎, 田代晋久, 脇若弘之, “商用周波数磁気ノイズを回収するエネルギーハーベスティング用鉄心コアの考察”, 第 23 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム, 2011 May 18-20 (ウイנקあいち)

⑨K. Tashiro, H. Wakiwaka, S. Inoue and Y. Uchiyama, “Energy harvesting of magnetic power-line noise”, Intermag2011, 2011 April 25-29 (TICC, Taipei, Taiwan)

⑩井上 伸一郎, 内山 悠, 田代 晋久, 脇若 弘之, “商用周波数磁気ノイズを積極的に回収するエネルギーハーベスティング用空心コイルの開発”, 第 19 回 MAGDA コンファレンス in 札幌, 2010 Nov. 22 (北海道大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田代 晋久 (TASHIRO KUNIHISA)
信州大学・工学部・助教
研究者番号：50325487

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし