

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25502001

研究課題名(和文) 環境磁界発電を用いた無線センサシステムの開発

研究課題名(英文) Development of wireless sensor system using magnetic energy harvesting

研究代表者

田代 晋久 (TASHIRO, Kunihisa)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：50325487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：環境磁界発電を用いた無線センサシステムの開発を行いました。磁束収束コイルや磁束収束コアの設計手法の提案とともに汎用性に優れたFM送受信機を用いたシステムを構築しました。本研究では、利用可能な磁界が回収電力に対応すること、回収エネルギー量の変動が電力利用の情報として利用できることに着目します。本研究成果により環境発電における最適負荷条件の導出、環境発電用エネルギー貯蔵装置の提案、磁界ソニフィケーションのコンセプトの提案も行いました。

研究成果の概要(英文)：A wireless sensor system using magnetic energy harvesting was developed. For practical use, the design and system based on a conventional FM radio were established. Through this study, optimum load condition and energy storage device for a conventional energy harvesting, and the concept of magnetic sonification were also proposed.

研究分野：磁気工学

キーワード：環境磁界発電 磁束収束コア 無線通信 非接触給電 ソニフィケーション

1. 研究開始当初の背景

近年、ワイヤレスセンサネットワーク (WSN) との連携を前提とした環境発電技術が注目されています。省エネを進める際には、利用者のモラルに頼るところが大きいです。一方、各種センサと連携して照明や空調をはじめとする機器の制御を行えば、効率的な省エネを推進できる点に優位点があります。日本でも東北大学の桑野教授らがセンサ・コミュニケーション・ソサエティを提案、環境発電技術の利用を前提とした防災・減災のためのセンサネットワーク実現の方向性を打ち出されています。

2. 研究の目的

本研究では、利用可能な磁界が回収電力に対応すること、回収エネルギー量の変動が電力利用の情報として利用できることに着目します。2つの磁束収束技術を用いて家電製品の近傍磁界から電力を回収し、省エネおよびヒトの安心・安全を提供する無線センサシステムの開発を行います。環境磁界発電によって得られるエネルギーで WSN を構築し、環境磁界を電力・情報として利用した省エネおよびヒトの安心・安全を守る環境磁界モニタリングシステムの開発を行うことを目的としました。

3. 研究の方法

(1) 磁束収束コイルの設計手法の開発

近傍磁界に対して有効な磁束収束コイルの設計手法を提案します。得られた設計手法を用いて磁束収束コイルを試作し、妥当性を確認しました。

(2) 環境磁界発電モジュールの開発

家電製品周囲の漏洩磁界を回収するため、近傍磁界を効率的に収束し回収する発電モジュールを設計・開発しました。磁束収束コアの設計手法の検討とともに、発電モジュール設計法の提案とその試作を行いました。

(3) 無線通信システムの開発

環境磁界発電モジュールで得られる電力を用いて通信する、汎用性の高い低消費電力無線通信システムの開発を行いました。1 J 以下のエネルギーを効率的に利用できるシステムを構築しました。

(4) 環境磁界モニタリングシステムの開発

開発した無線伝送システム・環境磁界発電装置を用いて、環境磁界モニタリングシステムを開発しました。また、他の環境発電モジュールを購入し、開発したシステムとの連携法を検討しました。

(5) 研究の統括

今後の展望と問題点を提起しました。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しました。

4. 研究成果

(1) 磁束収束コイルの設計手法の開発

単層の線電流モデルとして扱う近似モデル

を提案し、磁束収束の磁界分布実測値と偏差 5% で一致する結果を得ました。

図 1 に線電流モデルとした時の座標の定義を示します。本研究成果により、磁束収束コイルの磁束収束比 g は次式で近似できることを提案しました。

$$g = \frac{2\pi a \times 10^{-1}}{1.6994\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[K + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E \right] Q - 1$$

ここで a [m] は磁束収束コイルの平均半径、 K と E は母数を k とする第一種完全楕円積分、第二種完全楕円積分を表します。母数 k と補母数 k' は磁束収束比を推定したい点 (r, z) により、次式で与えられます。

$$k = \sqrt{\frac{4r^2}{4r^2 + z^2}}, \quad k'^2 = 1 - k^2$$

本成果の特筆すべき点として、 K と E を導出可能な近似式を提案した点にあります。

これにより、現場の技術者でも関数電卓や Excel 等の表計算ソフトで簡単に磁束収束比を推定できるようになりました。これにより、磁束収束コイルの抵抗 R [Ω]、インダクタンス L [H]、周波数 f [Hz] によって決まる共振の鋭さ Q により、磁束収束比が決定することを明らかにしました。図 2 に 60 Hz の一様磁界下での磁束収束比の実測値を示します。コイル中心付近に最大磁束収束比 30.4 の実測結果を得ることができました。図 3 に提案した推定値との誤差を示します。この結果より磁束収束コイルの設計手法が確立できたことを確認しました。同時に、本研究において一般的な家電製品周囲の 60 Hz 磁界の回収には利用できないことが理論的に明らかとなりました。

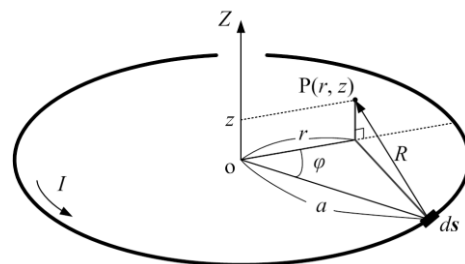


図 1 線電流モデルと座標の定義

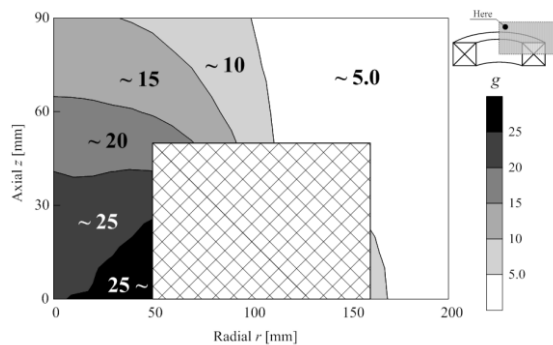


図 2 磁束収束比の実測値

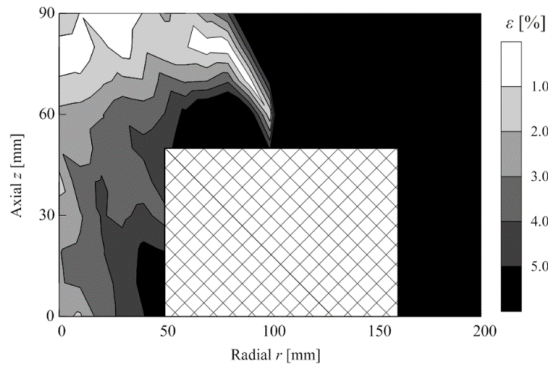


図3 近似式による推定値との誤差

(2) 環境磁界発電モジュールの開発

電化製品周囲から市販の無線通信モジュールが一回の通信に十分な 10 mJ のエネルギー回収を行いました。また、ダンベル形状の磁束収束コアに対する実効透磁率の推定式を提案しました。

図4に冷蔵庫周囲の環境磁界から電力回収に成功した環境磁界発電モジュールの一例を示します。磁性コア(Core)にフランジ(Flange)を取り付けた磁束収束コアを提案しました。図5に磁束収束コアの概念図を示します。磁束収束コアの磁束収束比(実効透磁率)推定には磁性体形状に大きく依存する反磁界推定が不可欠です。一方、理論解が存在する回転楕円体の反磁界係数は、こうしたダンベル形状の磁束収束コアにはそのまま使えません。そこで、回転楕円体の反磁界係数推定法を拡張し、磁束収束コアによる実効透磁率(磁束収束比)を推定する手法を提案しました。提案した手法は、フランジ部と狭窄部(磁性コア部)の反磁界係数を用いて記述する方法です。それぞれの反磁界係数 N_{flange} と N_{core} 従来の回転楕円体等でも近似が行えます。最終的に、磁束収束コアの実効透磁率は次式で近似できることを提案しました。

$$\mu_{eff} = \frac{1 - N_{core}}{N_{flange}} \times \left(\frac{d}{l}\right) \times \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

図6に提案した磁束収束コア設計法により得られた推定値、実測結果および有限要素法の解析結果との対比を示します。磁性コア全長に対する直径比 L/D が2程度までなら、提案した磁束収束コア設計法が十分使えることを確認しました。

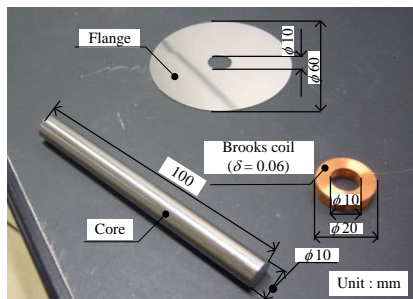


図4 家電製品用環境磁界発電モジュールの一例

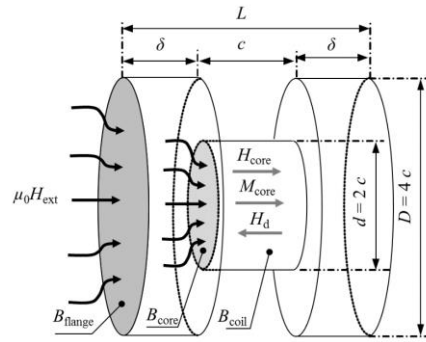


図5 磁束収束コアの概念図

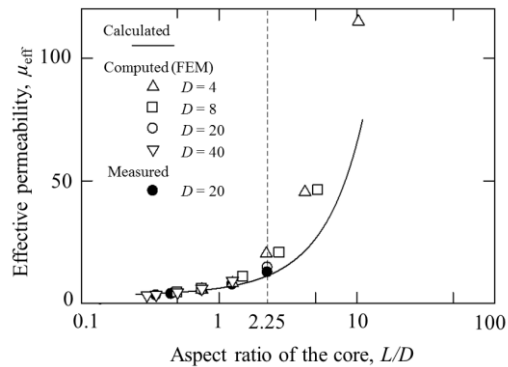


図6 磁束収束コアの実効透磁率

(3) 無線通信システムの開発

市場の動向を見ながら、環境磁界発電に最適な無線通信モジュールによるシステム開発を行いました。

図7にクラウドベースの無線センサシステムの一例を示します。汎用性の高いマイコンとアナログ I/O を搭載した Arduino に、3G 通信を可能とする 3G シールドを搭載したシステムです。本システムにより、環境磁界と本学キャンパス内の電力使用量との相関が得られるデータが得られました。一方、Arduino は常時 0.4 W 以上の電力が必要な点、クラウド経由で通信を行う 3G シールドとの組み合わせには数 W 程度の電力を賄うサイズの大きな環境磁界発電モジュールが必要だと結論付けました。図8に IEEE802.15.4 / ZigBee 規格により通信を行う近距離通信の TWE-Lite Dip とホストコンピュータによる無線センサ通信システムの一例を示します。60 Hz, 0.2 mT を発生した環境下で、無線センサノードである TWE-Lite Dip の駆動に成功しました一方、システム全体での消費電力、ホストコンピュータの消費電力、センサノードの動作可能電源の制約、応用への展開を考えたクラウドベースのデータ集約システムへの消費電力とシステム構築の汎用性の問題を明らかにしました。図9に FM 送信機による基礎実験用の試作機の一部を示します。動作可能電源への制約が少なく、研究室レベルで試作ができます。技術的背景からも AM 送信機と比較し FM 送信機は 15 点という少ない部品点数で構成が可能です。また、研究室レベ

ルの試作で消費電力は 4.8 mW@1.5 V という TWE-Lite Dip に匹敵する性能を実測により確認しました。一般の環境発電で問題となる発電可能電力・電圧の変動にも柔軟に対応でき、ホストコンピュータが使えない場合には市販の安価なラジオ (FM 受信機) により代用が可能です。これは宇宙開発において NASA が最優先する最優先事項、および日本の東北大地震時に最も日本人が再認識した「枯れた技術」の安定性・有用性に一致します。以上の検討結果から、環境磁界モニタリングシステムとして、FM 送受信機を採用しました。

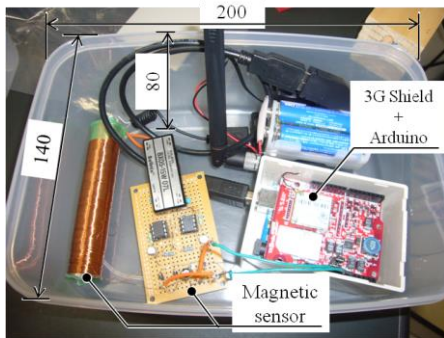


図 7 Arduino と 3G シールドを用いたクラウドベースの無線センサシステム

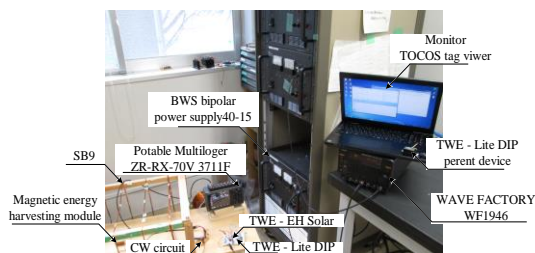


図 8 TWE-Lite Dip とホストを用いた近距離通信無線センサシステムの一例

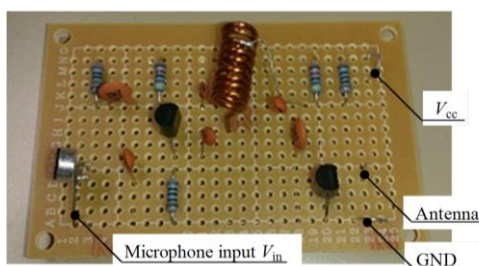


図 9 評価した FM 送信機の一例

(4) 環境磁界モニタリングシステムの開発

環境磁界のみで動作する FM 送受信機を用いた環境磁界モニタリングシステムを開発しました。

図 10 に FM 送受信機を用いた環境磁界モニタリングシステムの実験概念図を示します。この図では FM 送信機の電源を電源が繋がれた発振器から、FM 受信機は市販の FM ラジオを示しました。研究成果により FM 送受信機の電源は環境磁界からの電力で賄えることを実証しました。環境磁界発電を含む環境発

電は、キラーアプリケーションの提案が最も重要です。そのため、本研究では最も汎用性があるこの構成を最終提案としました。FM 送信機はボタン電池等でも長時間駆動可能のため、環境磁界発電との併用が最も好適な利用形態と結論付けました。FM 受信機は前述の災害時での利用を考え、流通かつ入手が容易な FM ラジオの利用を最も好適な利用形態と結論付けました。

図 11 に製作した FM 受信機の一例を示します。FM 波により環境磁界発電により得られた電力・情報を取り出せる装置です。今後のキラーアプリケーション創出に合わせ、安価に構成可能、PC が不要、mW オーダで動作可能かつヒトへの情報伝達が容易な音として情報を認知させる装置構成としました。多数のセンサノードに対しても、通常の WSN と同様に FM 波の周波数や送信時間を分割することで柔軟に可能です。図 12 に 0.2 mT @ 60 Hz の環境磁界下で FM 送受信機を連続動作できる環境磁界発電モジュールの一例を示します。バッテリーを使用せず環境磁界モニタリング装置に十分な 10 mW を超える発電電力が得られることを実証しました。

一方、本研究により得られた知見として今後の展望として 2 つの問題点を明らかにしました。1 点目は環境磁界発電モジュールのサイズです。生活環境下の環境磁界発生源から十分遠方のエネルギー源を対象とした設計では、今回のような 2.5 kg 程度の重量を有する環境磁界発電モジュールが必要となりました。これは通常環境発電の用途を目指した応用では決定的なデメリットとなります。一方、コンセントからの電源供給による家電製品を対象とする場合、電源コードをクランプする電流センサ用 CT を環境磁界発電モジュールに利用可能であることを明らかにしました。2 点目は環境磁界として注目した商用周波数を超える周波数での利用です。図 13 に図 12 で示した環境磁界発電装置の発電電力周波数依存性を示します。この結果は従前より知られている磁性体の鉄損・渦電流損の問題を如実に表しています。つまり、高い周波数においては低周波磁界用に設計した磁束収束コアを使用しないほうが有利であることを示しています。

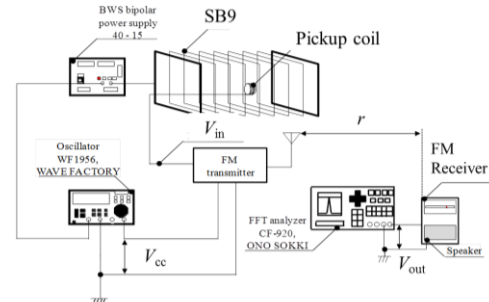


図 10 FM 送受信機による無線センサシステムの概念図

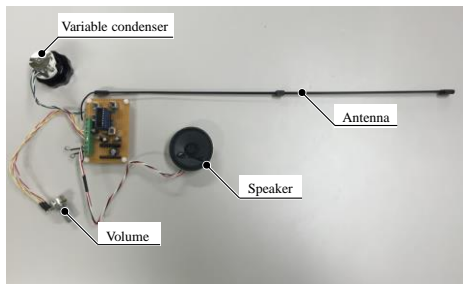


図 11 環境磁界モニタリング用 FM 受信機
の一例

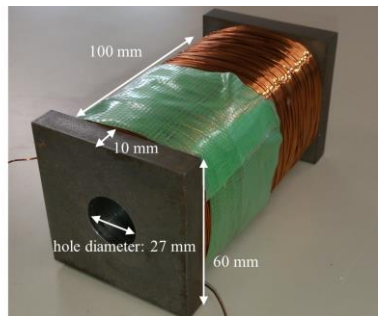


図 12 FM 送信機用環境磁界発電モジュール
の一例

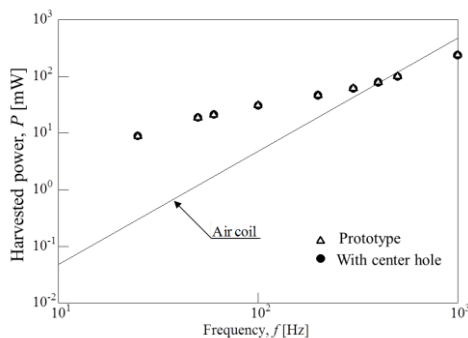


図 13 FM 送信機用環境磁界発電装置の発
電電力周波数特性

(5) 研究の統括

本研究では環境磁界を電力・情報として利用した省エネおよびヒトの安心・安全を守る環境磁界モニタリングシステムを開発しました。当初の目的以外で得られた成果と今後の展望を踏まえ、主な 3 点を述べます。

- ① 環境磁界発電を含む環境発電用の最適負荷条件の導出です。環境発電では整流・降昇圧回路を含む電力管理モジュールが不可欠です。本研究でも利用した Cockcroft-Walton 回路を例に、エネルギー保存の法則から回路素子の損失が無視できる場合を例に最適負荷条件を理論的に導出しました。この成果は環境磁界発電の理論限界を示すとともに、Drone をはじめとする移動体への活動制御の応用を提案する契機につながりました。
- ② 環境発電用エネルギー貯蔵装置の提案です。運動・電気・磁気エネルギー貯蔵装置の利点を合わせ持つ手法を考案し、AEM 学会論文賞を受賞しました。この成

果は、全く想像がつかなかった医工連携の技術シーズ創出につながりました。

- ③ 磁界ソニフィケーションの概念の提案です。ソニフィケーションは WSN 等で得られるビックデータ解析手法として再注目されています。国際学会での発表を通じ、1st runner up: paper presentation, ICST2015 を受賞しました。この成果は工学だけでなく、芸術を含む他分野への応用が期待できます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件): すべて査読有

- (1) Kunihisa Tashiro, Hiroyuki Wakiwaka, Concept of magnetic sonification device. 2015 9th International Conference on Sensing Technology (ICST), pp. 546-549, 2015. (DOI: 10.1109/ICSensT.2015.7438458)
- (2) 田代 晋久, 脇若 弘之, 池上 梓, 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. 日本 AEM 学会誌, Vol. 23, Vol. 4, pp.692-697, 2015.(DOI: /10.14243/jsaem.23.692)
- (3) K. Tashiro, H. Wakiwaka, G. Hattori " Estimation of effective permeability for dumbbell-shaped magnetic cores", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 51, No. 1, 4000304, 2015 January (DOI: 10.1109/TMAG.2014.2359468)
- (4) K. Tashiro, A. Ikegami, S. Shimada, H. Kojima, H. Wakiwaka, " Design of magnetic field alarm powered by magnetic energy harvesting", International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, Proceedings of ICST2014, pp. 396-400, 2014. (ISSN 1178-5608, www.s2is.org)
- (5) Kunihisa Tashiro, Hiroyuki Wakiwaka and Syoichiro Shimada, "Demonstration of magnetic energy harvesting from electrical appliances", Journal of Energy and Power Engineering 8 , pp. 568-572, 2014.

〔学会発表〕(計 20 件)

- (1) Kunihisa Tashiro, Hiroyuki Wakiwaka, Concept of magnetic sonification device. 2015 9th International Conference on Sensing Technology (ICST), pp. 546-549, 2015. Dec 8-10. (Auckland University, NewZealand)
- (2) 伊東元気, 田代晋久, 脇若弘之, 環境磁界発電を応用した小型無人航空機の姿勢検出に関する基礎検討, 東北大学スピニクス研究会, 15-5-15 , 2015. Nov. 19-20. (信州大学工学部)
- (3) 伊東元気, 田代晋久, 脇若弘之, 環境磁界発電を応用した簡易ナビゲーションシステムの基礎検討, 第 24 回 MAGDA コンファレンス in Tohoku(MAGDA2015), OS4-1, 2015. Nov. 12-13. (東北大学電気通信研究所)
- (4) 小嶋宏明, 田代晋久, 脇若弘之, 平板型磁界発電モジュールの回収電力推定. 電気学会リニア

- ドライブ研究会, LD-15-004, 2015 June 15-16. (信州大学工学部)
- (5) 朽名周平, 田代晋久, 脇若弘之, "環境発電用エネルギー変換装置の検討", 第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD27), 14C07, 2015 May 14-15. (長崎県ハウステンプス)
- (6) 田代晋久, 脇若弘之, 池上梓, "環境磁界発電用電力変換回路の最適負荷条件の検討", 第23回MAGDAコンファレンス in 高松, PS19, 2014 December 3-4. (サンポートホール高松)
- (7) (Invited) 田代晋久, 脇若弘之, 丸野将太郎, "対向配置磁石型非接触エネルギー伝送装置の試作", 第23回MAGDAコンファレンス in 高松, 日本AEM学会論文賞受賞講演, 2014 December 3-4. (サンポートホール高松)
- (8) 小嶋宏明, 田代晋久, 脇若弘之, "平板型環境磁界発電モジュールの性能評価", 電気学会マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会, MAG-14-140/MD-14-106/LD-14-084, 2014 November 20-21. (金沢大学)
- (9) K. Tashiro, A. Ikegami, S. Shimada, H. Kojima, H. Wakiwaka, "Design of magnetic field alarm powered by magnetic energy harvesting", 8th International Conference on Sensing Technology(ICST2014), S9C: Magnetic and Electromagnetic Sensors 1, 2014 September 2-4. (Liverpool, UK)
- (10) 島田翔一郎, 田代晋久, 脇若弘之, "磁束収束コアの実効透磁率推定誤差の調査", 電気学会リニアドライブ研究会, LD-14-035, 2014 July 4. (豊田工業大学)
- (11) 池上梓, 服部玄也, 島田翔一郎, 小嶋宏明, 田代晋久, 脇若弘之, "環境磁界発電を用いたxBeeによる無線通信の検討", 第26回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD26 in 盛岡), 21Bp10, 2014 May 21-23. (アイーナ岩手県情報交流センター)
- (12) 田代晋久, 脇若弘之, 丸野将太郎, "環境発電用エネルギー貯蔵装置の設計", 第26回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD26 in 盛岡), 21Bp9, 2014 May 21-23. (アイーナ岩手県情報交流センター)
- (13) 服部玄也, 田代晋久, 脇若弘之, "2種の磁束収束技術を用いた環境磁界発電量の推定", 電気学会マグネティックス研究会, MAG-14-040, 2014 March 27-28. (岩手大学工学部および八幡平ロイヤルホテル)
- (14) 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", 電気学会マグネティックス研究会, MAG-13-093, 2013 Nov. 24-25 (金沢大学)
- (15) 服部玄也, 田代晋久, 脇若弘之, "磁束収束コイルで得られる磁束収束比の推定", 電気学会マグネティックス研究会, MAG-13-092, 2013 Nov. 24-25 (金沢大学)
- (16) (Invited) K. Tashiro, "Energy from environmental magnetic field of 0.2 mT at 60 Hz", 2nd WiPoT Symposium (Time: 14:50-15:15), Aug. 29, 2013. (京都大学東京オフィス)
- (17) (Invited) K. Tashiro, "Magnetic energy harvesting – power from environmental magnetic field", Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR), CC3DMR 2013 Conference Room 9, 8th floor (Time: 14:30-15:00), June 25, 2013. (RAMADA PLAZA JEJU Hotel, Korea)
- (18) 中野亮, 田代晋久, 脇若弘之, "磁気モーメント法解析ソフトを用いた Simple-Box-9 コイルシステムの評価", 電気学会マグネティックス/リニアドライブ合同研究会, MAG-13-038/LD-13-42, 2013 June. 20-21. (信州大学工学部)
- (19) 島田翔一郎, 田代晋久, 脇若弘之, "家電製品を対象とした環境磁界発電モジュールの設計", 電気学会マグネティックス/リニアドライブ合同研究会, MAG-13-030/LD-13-34, 2013 June. 20-21. (信州大学工学部)
- (20) (Invited) K. Tashiro, "Possibility of Wireless Power Transimission Using Magnetic Energy Harvesting", BIT's 2nd Annual World Congress of Advanced Materials, Session 2-6: (Time: 14:30-15:00), June 6, 2013. (Grand Trustel Aster Suzhou, Suzhou, China)
- [図書] (計 3 件)
- (1) 田代晋久 (監修), 脇若弘之, 佐藤敏郎, 曾根原誠, 水野勉, 卜 穎剛, 宮地幸祐, 中澤 達夫, 生稲 弘明, 笠井 利幸, "環境磁界発電原理と設計法", 科学情報出版, 2016.3.24, ISBN 978-4-904774-43-4.
- (2) S. C. Mukhopadhyay (ed.), K. Tashiro, A. Ikegami, S. Shimada, H. Kojima, H. Wakiwaka, "Next generation sensor and systems (Chapter 14: Design of self-generating component powered by magnetic energy harvesting – magnetic field alarm), Springer, 2015, ISBN 978-3-319-21670-6.
- (3) 篠原真毅 (監修), 田代晋久, "電界磁界結合型ワイヤレス給電技術 – 電磁誘導・共鳴送電の理論と応用 – (11章6節 環境磁界発電を担当)", 科学情報出版, 2014, ISBN 978-4904774281.
- [その他] ホームページ等
- 信州大学工学部田代研究室
<http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/engineering/chair/elec005/>
- 信州大学環境磁界発電プロジェクト
<http://www.shinshu-u.ac.jp/project/kankyojikai/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 田代 晋久 (TASHIRO, Kunihisa)
 信州大学・学術研究院工学系・准教授
 研究者番号: 50325487