

環境磁界発電プロジェクト

Magnetic Energy Harvesting Project

田代 晋久^{*1}(正員)

Kunihisa TASHIRO (Mem.)

This article describes the motivation and basis of magnetic energy harvesting project. Magnetic field is a reusable energy source to be used for both energy harvesting and wireless power transmission applications. From a human effects perspective, ICNIRP2010 provides a guideline for acceptable electromagnetic field level. In this project, "environmental magnetic field" means this acceptable magnetic field level. The main purpose of this project is to provide both of "self-generating parts" and "killer applications" using environmental magnetic fields.

Keywords: magnetic energy harvesting, environmental magnetic field, self-generating parts, killer application

1 緒言

環境発電はお金がかかる。2015 年 12 月に開催された国際会議, ICST2015 (The 9th international conference on sensing technology) での招待講演で聞いた発言である[1]。ドイツは環境発電で有名な EnOcean[2]の本社がある。同国 Technische Universität München の Norbert Schwesinger 先生による説明は, 理解を得やすいものであった。環境発電装置が企業の努力により量産価格一個 1000 円で提供できるようになったと仮定する。そこまでの開発コストは度外視しよう。そもそも環境発電は電池不要のメリット, ワイヤレスセンサネットワークへの電源としての利用が前提にある。例えば, 10,000 個の環境発電装置を設置したとすると, 部品代だけで 1000 万円という初期投資が必要になる。環境発電において安価かつ簡便な装置構成が必須だけでなく, キラアPLICATIONの提案が不可欠である。この点は筆者らが環境磁界発電を提唱した当初から重要視していたことに一致する。こうしたお膳立ての特別講演の存在もあり, 次の日に口頭発表した Concept of magnetic sonification device に対し, 1st runner up: paper presentation, ICST2015 の受賞を得た。

キラアPLICATION提案の重要性は環境発電だけでない。2007 年に MIT の Kurs らが Science に発表した論文[3]が発端となり, 国内でも産業界・学术界に研究契機を与えている非接触給電も同様である。送

受電側の電力伝送効率が 90 %以上あっても, システム全体としての効率是有線給電に及ばない。商用周波数電源あるいは直流電源から高周波電磁界を生成する高周波用電源, 給電電力を利用するために整流・昇降圧・蓄電を行う電力管理回路等。これら 2 つが 90 %の効率を達成したとしても, システム全体では 72 %の効率が限界となる。また, 電磁界を用いる場合には様々な法規制を遵守する必要がある。生体磁気分野に携わる技術者として, ヒトへの電磁界暴露ガイドライン ICNIRP2010 [4]はその中でも最重要視する。こうした拘束条件の中で非接触給電の普及には, 有線給電では得られない「何か」を付加価値として提供できる利用法の提案が不可欠である。

2011 年に提案した環境磁界発電[5]は, 2012 年の Metrology for energy harvesting (European metrology programme) の e-newsletter に取り上げられた[6]。記事の中で, 「2007 年に MIT のグループが Science で提案した非接触給電における磁界共鳴方式を初めて環境発電に応用した例」と紹介された。低周波磁界における環境磁界発電において, 磁界をエネルギーとして回収・発電する原理は, 電磁誘導方式や磁界共鳴方式と呼ばれる非接触給電技術と大きな違いはない。つまり, コイルに鎖交する磁界をファラデーの電磁誘導の法則に基づき起電力として獲得し, 対象となる周波数に対して必要に応じて共振用キャパシタを接続し, 効率よく負荷に電力として取り出す。その設計で重要なポイントは, 磁界発電用コイルのパラメータを上手に設計する点にある。ここでは, 筆者が代表を務める信州大学環境磁界発電プロジェクト[7]の紹介とともに, 環境

連絡先: 田代晋久, 〒380-8553 長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部田代研究室

e-mail: tashiro@shinshu-u.ac.jp

^{*1} 信州大学

磁界発電の基礎と応用の一部を紹介する。環境発電と非接触給電の利点を生かした日本発の技術創生を目指した取り組みの存在を周知頂けることを目的とする。

2 信州大学環境磁界発電プロジェクト

2.1 プロジェクトの概要

信州大学スピンドバイステクノロジーセンター (SDTC) は磁気応用の研究を行う 20 名近くの教員が集まったバーチャルな研究所である。信州大学環境磁界発電プロジェクトは、磁束収束技術、渦電流抑制技術、複合媒質を用いた波長短縮効果、CMOS プロセスを用いた AC/DC 変換素子というキーテクノロジーを持ち寄った初めてのスピノフプロジェクトである [7]。全ては 2012 年 6 月、居酒屋での 5 名の教員によるプロジェクト会議からスタートした。現在は信州大学関係者の 10 名で構成されたメンバーで活動している。2015 年 1 月の段階で、英語による招待講演を 3 回、主催の講演会を 1 回、協賛の研究会・講演会を 5 回、展示会出展 3 回を行っている。本プロジェクトは平成 25 年度信州大学地の森未来プロジェクト (PLANTheFirst 推進経費) 採択事業としても採択された。信州大学環境磁界発電プロジェクトの存在は、2014 年 12 月に科学技術出版より出版された「電界磁界結合型ワイヤレス給電技術 (科学技術出版)」の中にも紹介した [8]。プロジェクト会議は通常の会議室とは一線を画した、密度の濃い議論を交えながら年に 6 回程度続けている。2014 年 5 月の段階で 12 回目の会議報告をまとめた 2 冊の会議報告書をメンバー向けに作成した。近年様々なプロジェクトの立ち上げを目にするが、3 年以上もスタート当初の勢いそのままに続けることは難しい。開発者が楽しくなければ、出来上がったモノも笑顔で世の中に受け入れられないと考える。今もコードネーム「ふくろう」の名のもと、次の 3 年を目指し活動を行う。

Fig. 1 に信州大学環境磁界発電プロジェクトの概念図を示す。信州大学環境磁界発電プロジェクトでは国際非電離放射線防護委員会が定める ICNIRP2010 のガイドライン値以下の磁界を、私たちの生活環境下での存在を許容された「環境磁界」と定義する。2015 年 6 月現在の環境磁界発電の位置づけは、一般的な環境発電と非接触給電とも異なる。環境磁界発電のターゲットは大きく分けて 2 つある。一つ目は磁界を電力だけでなく情報として利用するものであり、バッテリーレ

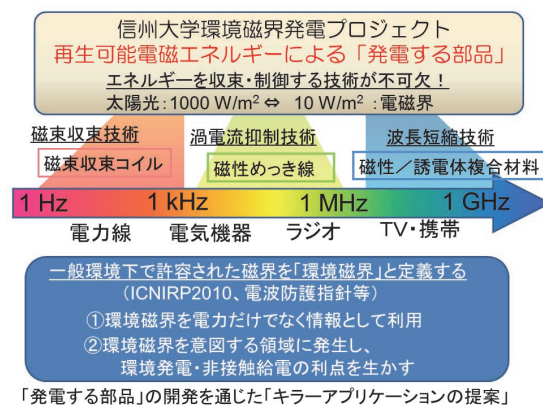


Fig. 1 Magnetic energy harvesting project in Shinshu University.

スの磁気センサや電流センサ等が該当する。二つ目は環境磁界を意図する領域に発生させ、環境発電と非接触給電の両者の利点を生かすことに該当する。

2.2 磁界を電力だけでなく情報として利用

2012 年 5 月末、坂城町と工学部によりエネルギーの効率的な使用、管理、運用による美しい街づくりを目指して産学官連携事業「坂城スマートタウン構想」がスタートした [9]。長野県坂城町の人口は約 1 万 6 千人と比較的コンパクトな町であるが、幅広い業種や技術分野に特色をもった約 240 社の製造企業が集積する工業の町である。町のエネルギー事情、特に電力需要については製造業が全町の 81% を占めているため、「坂城スマートタウン構築」の第一次活動として製造業の省エネが取り上げられた。工場全体の使用電力の見える化は保安協会のデマンドメーターの設置で把握出来るが、効果的な省エネ活動に取り組んでいくためには、各製造ラインに電流センサを取り付け、個々の生産活動、消費電力の見える化をはかることにより、初めて問題点の抽出、対策が可能となる。坂城町のエネルギー構想は安定した電力供給を確保するシステム、スマートグリッドの導入、具体的には信州大学工学部田中清研究室 [10] 開発の遺伝的アルゴリズムによるエネルギーの最適化、効率的制御 (EMS) が最終目的とされた。

信州大学環境磁界発電プロジェクトメンバー、生稲弘明コーディネータの要請を受け、第 2 次電力モニターシステム開発の助言を行った。Fig. 2 にミドリ電子 [11]、花岡治課長によって開発されたバッテリーレス電流センサを示す。第 1 次電力モニターシステムでは有線による電流センサのため分電盤のふたが閉まらない、通信用 100 V 電源の確保が不可欠なため工場内配

線が煩雑になる, センサと受信端末との無線通信がスター型接続のため建物間では電波の到達が安定しないという問題があった。第2次電力モニターシステムでは 0.2 A でも磁界から電力を得るとともに, 電流量の情報として利用できるワイヤレス・バッテリーレスの電流センサが開発された。通信用モジュールは消費電力が少なく通信有効範囲が広い EnOcean の無線センサモジュールが採用された。通信方式は広い工場でもデータ通信が可能なマルチホップ方式の適用を基本コンセプトとしている。Fig. 3 に電力モニタリングシステムの概念図を示す。現在, 信州大学工学部に 300 台のセンサが配置され, 電力の見える化と省エネに関する実証実験が行われている。

2.3 環境磁界を意図する領域に発生 (模擬)

非接触給電では, 電力を供給する給電コイルと, 電力を受給する受電コイルの2つで構成される。環境磁界発電では, バッテリーレス電流センサのような用途を対象にした場合, すでに設置済みの電力線を給電コイルとして利用できる。つまり環境磁界発電における一つのターゲットは, 環境発電と同様に再生可能エネルギーを活用するための受電コイルに注目したものである。環境磁界発電の二つのターゲットは, 給電コイルを必要とする。この応用では, ICNIRP2010 ガイドライン値を上限とする磁界 (環境磁界) を, 受電コイルを利用したい対象とする空間・平面・点へ均一に発生 (模擬) することが給電コイルの設計に相当する。環境磁界発電では, 意図する領域内で得られる電力は一定となる特徴を有する。3 次元的な大空間に均一な環境磁界発生を行うには, ソレノイドコイルやヘルムホルツコイルに代表される円形コイルではなく, 正方形コイルを組み合わせたコイルシステムが製作容易で構造上の利点が多い。

Fig. 4 に 3 次元的な空間に環境磁界を発生するコイルシステムの一例を示す。Fig. 4(a) は Simple-Cubic-3 コイルシステム(SC3)であり, 正方形コイルを3つならべたものである。SC3 は一辺が d [m] の正方形コイルを $d/2$ の間隔で3つ並べたもので, それぞれのコイルに流れる電流比が 2:1:2 となるようにコイルの巻数比を設計したものである。SC3 を直交方向に3セット組み合わせることで, 中心から直径 $d/2$ の球領域内の任意方向に環境磁界を発生できる。中心の発生磁界は電流値から $2.978/d$ [$\mu\text{T/A}$]と計算できる[12]。この例では巻数が 24:12:24, コイル一辺が 2 m であるため, 1 A の電



Fig. 2 Wireless current sensor without battery.

The installed Power monitoring system

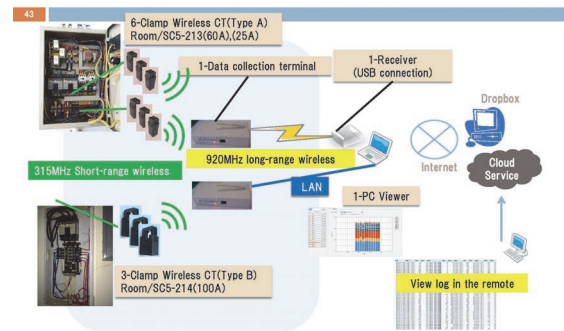


Fig. 3 Power monitoring system.

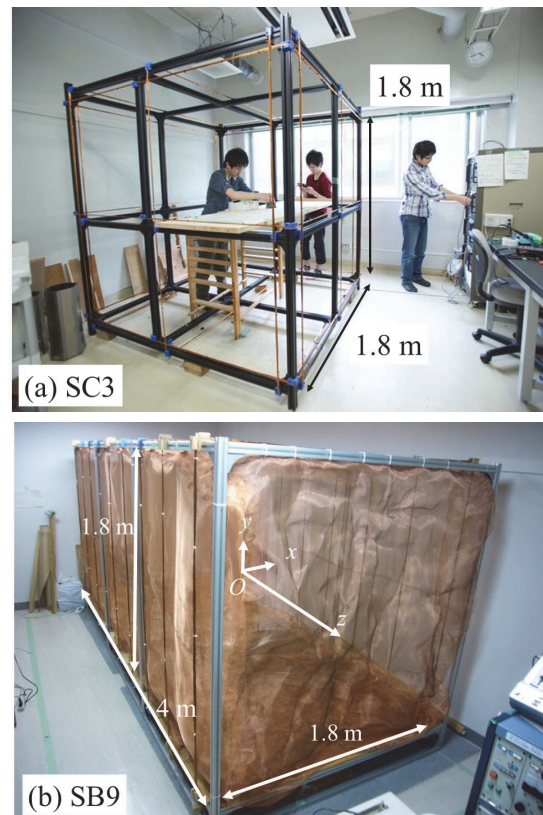


Fig. 4 Examples of coil system for generating environmental magnetic fields to desired space.

流を流すことで $17.87 \mu\text{T}$ の磁界を発生できる。3 軸方向へ磁界を発生できるため、時間的に振幅の方向が回転する回転磁界の発生も行えるため、送電線等周囲の磁界の模擬も行うことができる。Fig. 4(b) は Simple-Box-9 コイルシステム(SB9)であり、正方形コイルを 9 つならべたものである。SB9 は一辺が $d[\text{m}]$ の正方形コイルを $d/4$ の間隔で等間隔に 9 つ並べたもので、それぞれのコイルに流れる電流比が 2:1:1:1:1:1:1:2 となるようにコイルの巻数比を設計したものである。中心の発生磁界は電流値から $4.762/d [\mu\text{T/A}]$ と計算できる。写真のものはコイル一辺が 2 m (磁界発生方向の一辺が 4 m)、巻数比が 28:14:14:14:14:14:14:28 であるため、1 A の電流を流すことで $37.04 \mu\text{T}$ の磁界を発生できる。SB9 が占める体積と比較し、約 20 % の空間で偏差 1 % 以下、約 50 % の空間で偏差 10 % 以下の一様磁界を発生できる[12]。なお SB9 コイル内部にはファデーケースを装荷することで、電界の影響を遮蔽している。一例として、SB9 コイル内部に配置した環境磁界発電装置の発電電力の実測値を Fig. 5 に示す。本実験では中心磁界を $141.4 \mu\text{Tp-p}$, 60 Hz とした。偏差 1 % 及び 10 % の磁界が実測で得られた範囲を点線で示した。中心で得られた発電電力と、各距離で得られる発電電力の偏差を算出してある。中心磁界との偏差が小さい領域では同じ発電電力が得られる。たとえば偏差 10 % 以内の一様磁界空間であれば発電電力も偏差 20 % 以内となる。

3 環境磁界発電の基礎

3.1 発電する部品の構成

Fig. 6 に環境磁界発電にて発電する部品の構成要素を表現したブロック図を示す。例えば商用周波数磁界となる 50/60 Hz では ICNIRP2010 ガイドライン値における公衆暴露上限値となる 0.2 mT までを環境磁界と定義し、発電に用いる。発電する部品には 2 つのモジュールが必要となる。一つ目は磁界を電気に変換する磁界発電モジュールである。低周波領域は筆者と脇若弘之名誉教授、中間周波数領域は水野勉教授とト穎剛助教、高周波領域は佐藤敏郎教授と曾根原誠准教授が主に担当している。二つ目は電気エネルギーを交流から直流に整流・昇降圧・貯蔵し負荷に供給する電力変換モジュールである。貯蔵の機能を除いた電力変換モジュールについて、筆者らはキャパシタとダイオードのみで構成可能な Cockcroft-Walton 回路(CW 回路)、宮

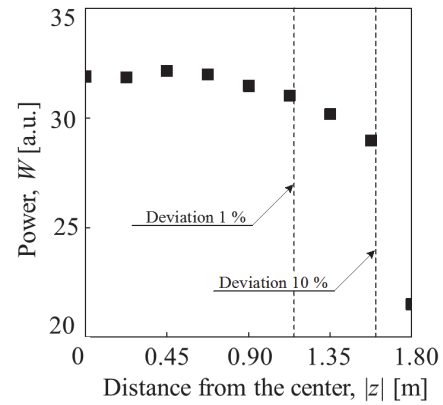


Fig. 5 Example of measured harvesting power.

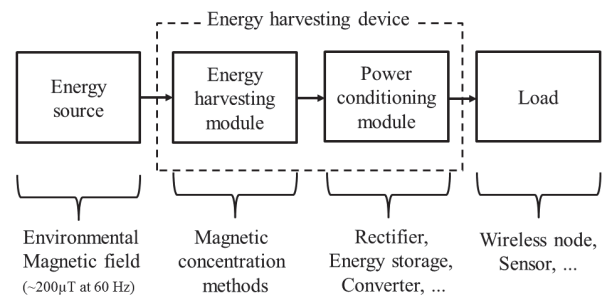
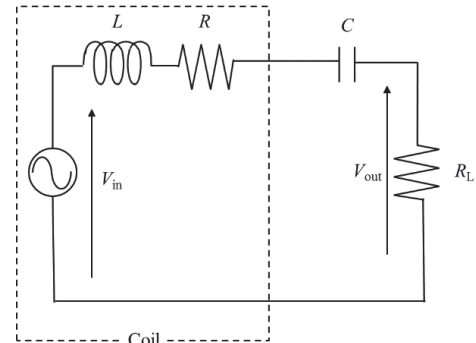
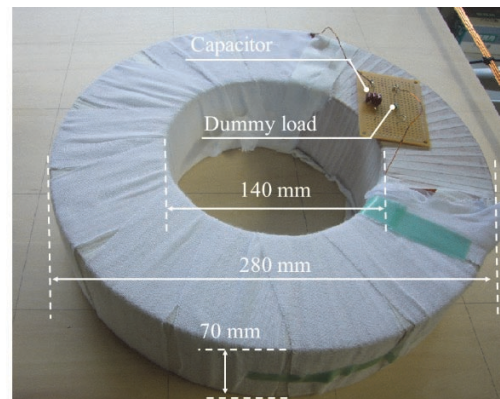


Fig. 6 Energy flow in the energy harvesting device.



(a) Equivalent circuit



(b) Configuration example with Brooks coil

Fig. 7 Example of energy harvesting module.

地幸祐准教授は CMOS 集積回路を用いたチャージポンプ型整流器やブーストコンバータを検討している。

3.2 磁界発電モジュール

低周波領域における磁界発電モジュールの等価回路を Fig. 7(a)に示す。ファラデーの電磁誘導の法則より、コイル巻数を増加させると誘起電圧が増加するため、細線による巻数増加が電力増加につながると誤解に陥る場合が少なくない。空心コイルを用いた磁界発電モジュールの場合、コイル形状を決定することで回収可能電力の理論値はコイルサイズで決定される。例えば Fig. 7(b)のようなコイル幅 c : 内径 $2c$: 外径 $4c$ の比が 1:2:4 となる円形コイル(Brooks コイル)の場合、次式で与えられる[13]。

$$W = c^5 \times (27\pi^3 \beta f^2 / 16\rho) \times (\mu_0 H)^2 \quad [\text{W}] \quad (1)$$

ここで、 c [m]はコイル幅、 β はコイルの占積率、 f [Hz]は対象とする周波数、 ρ [Ωm]は巻線の体積抵抗率、 $\mu_0 H$ [T]はコイルに鎖交する平均磁束密度を示す。温度が一定とみなせば巻線の体積抵抗率は一定、コイルの占積率は理論値を 1 とし巻線加工技術によって決まる。コイルの利用可能な環境磁界の大きさと周波数が決まれば、発電可能電力はサイズを決定するパラメータ c の 5 乗で決まる。発電電力は磁界振幅の 2 乗に比例するため、利用できる環境磁界を集めることができれば、磁界発電モジュールの小型化が行える。Fig. 8 に磁束収束コイルと磁束収束コアの概念図を示す[14]。磁束収束コイルは共振用キャパシタを接続したコイルであり、 Q 値（共振の鋭さ）が高いほどコイル内径部付近に磁界を収束するレンズのような役割を担う。Fig. 7(b)を磁束収束コイルとして用いると、60 Hz の磁界に対し 20 倍程度の磁束収束比 g が得られる。低周波磁界に対し高い Q 値を得るためのコイルは大型となるため、環境磁界が利用可能な場所に据え置きとし、必要に応じて磁界発電モジュールを近づけるという使い方を想定している。磁束収束コアは磁界を集めて磁界発電モジュール用コイルに鎖交させる役割を担う。注意すべき点として、使用する磁性材料の透磁率が無限大であっても、コア形状による反磁界によって決まる実効透磁率 μ_{eff} が磁束収束比を決めることが挙げられる[15]。Fig. 9 に Brooks コイル直径と回収可能電力の推定値を示す。白抜きプロットは Fig. 7(b)を磁界発電モジュールとして得られた電力を示す。0.2 mT, 60 Hz の環境磁

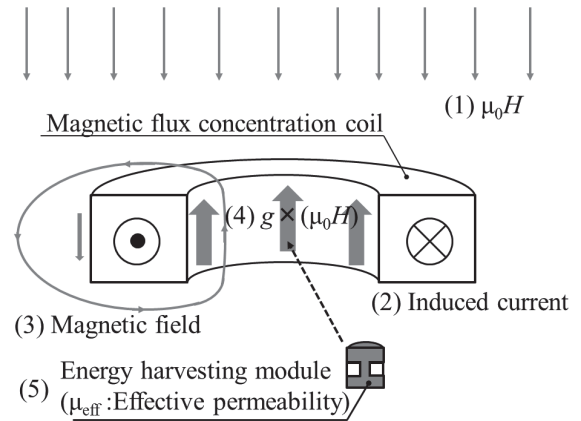


Fig. 8 Concept of the magnetic flux concentration [14].

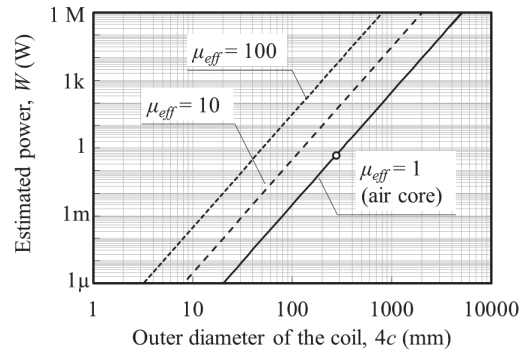


Fig. 9 Estimated power as a function of coil size[13].

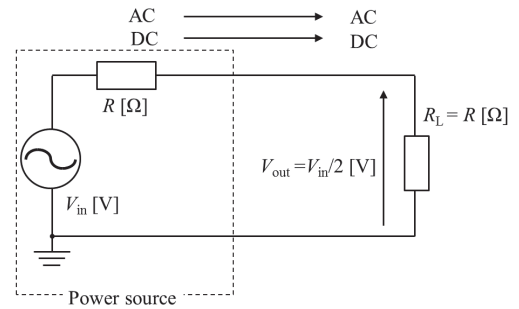


Fig. 10 Optimum load based on maximum power transfer theorem.

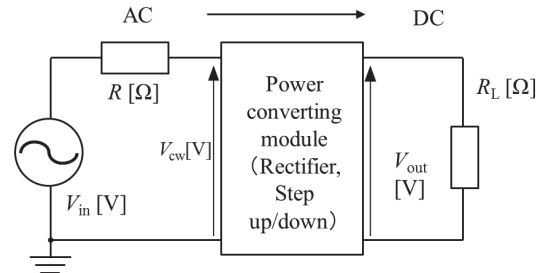


Fig. 11 Equivalent circuit of a magnetic energy harvesting device having power converting module.

界に対し、直径 2 cm で得られる電力は 1 μ W 程度である。2 種類の磁束収束技術を用いた一例として、直径 2 cm の磁界発電モジュールでも 50,000 倍となる環境発電の応用に十分な 50 mW の電力回収が行えることを報告している。一方、磁束収束技術を用いなくとも直径が 30 cm や 320 cm の Brooks コイルを用いれば、1 W や 100 kW 程度の電力回収が見込める。このように環境磁界発電では電力の観点から環境発電および非接触給電両者への応用が可能である。

3.3 電力変換モジュール

Fig. 10 に示すように、電源電圧 V_{in} [V]、内部抵抗 R [Ω] を有する電源で負荷 R_L [Ω] に電力を供給する場合を考える。テブナンの定理より開放電圧が電源電圧、両端に擬似負荷を接続した際に流れる電流より内部抵抗あるいは内部インピーダンスを算出できる。この場合の電源は直流でも交流でも良い。電気回路における最大電力供給の定理から、電源から負荷へ最大の電力を供給するための最適負荷は内部抵抗に一致し ($R_L=R$) であり、負荷に供給される電圧は電源電圧の半分 ($V_{out} = V_{in}/2$) である。Fig. 11 は電力変換モジュールを含む環境磁界発電装置の等価回路を示す。ここで、共振用キャパシタを挿入した磁界発電モジュールは、電源電圧とコイル抵抗からなる電力源と仮定できる。ここで V_{cw} [V] は整流・昇圧を行う電力変換モジュールに入力される電圧、 V_{out} [V] は負荷に供給される直流電圧を示す。昇圧を含む場合の最適負荷は内部抵抗には一致しない。最大電力供給の定理が意味するものは、電源の内部抵抗と負荷において同じ電力が消費された条件を指す。つまり電力変換モジュールに損失がない場合、 $V_{cw} = (1/2) V_{in}$ の時に最大電力が負荷側へ供給される。また、 V_{out} は V_{cw} 波高値の s 倍の値となる場合、電源側の内部抵抗 R と負荷 R_L で消費される電力が等しいとする条件より、最適負荷条件は次式で記述できる[16]。

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

Fig. 12 に CW 回路で構成した電力変換モジュールを含む環境磁界発電装置の最適負荷条件の実験結果の一例を示す。塗りつぶしのマーカーは、各段数において導出された最適負荷条件時の抵抗値 R_{ideal} を示し、最大電力供給の定理から導出される供給電力の最大値を実線で示した。推定と実測より得られた最適負荷の抵抗値は最大 40 % 程度の差異がみられるが、 R_{ideal} 接続時に得

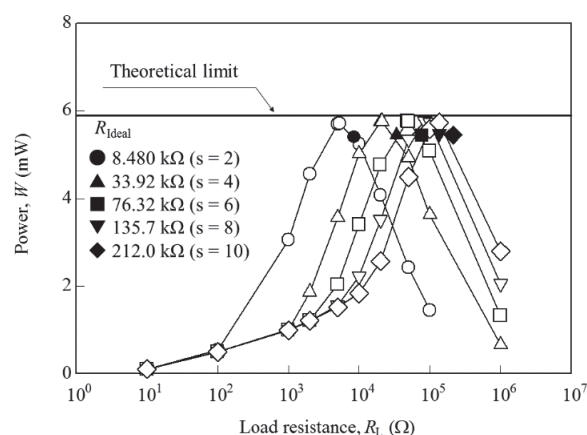


Fig. 12 An example of experimental confirmation of optimum load condition [16].

られる電力は理論値と相対誤差 6 % 以下で一致したことを報告している。

4 キラーアプリケーション

4.1 プロジェクトの目指すもの

電磁気学に疑問を投げかける名著「メタ電磁気学」には次のような一節がある[17]。「Meta-Mathematica (数学の次) は物理学を生み出し、Meta-Physics (物理の次) は形而上学・心理学という新しい研究分野・学問を生み出した」。環境磁界発電の利用を考える上で、現状の問題点を見つけ疑問を投げかけることも意義の一つであると考えている。「メンバーが楽しくないと新分野を開拓する意味もない」と言う用語弊もあるが、通常の複合領域研究の進め方との違いを発見していただけることを目指している。ここでは、キラーアプリケーション創出へ向けた、スピンオフ研究の一部を紹介する。

4.2 環境磁界ソニフィケーション

環境磁界は電力・情報として利用できる半面、ヒトの五感で認知することができない。環境磁界のソニフィケーション(Magnetic sonification)は、環境磁界の可聴化を通じた環境磁界発電の利用の実例である。Fig. 13 はその先駆けに提案したゼロパワー磁気センサのひとつ、磁界警報器である[18]。現在、部品点数 15 個の安価な FM トランスミッターを用いた磁界ソニフィケーション装置のコンセプトを提案している。ソニフィケーションは 1919 年の異なる発見・発明(バルクハウゼンノイズ・テルミン)で磁気応用分野に関連が深い。近年は化学の音の可聴化[19]やビックデータの解析認

知法に代表されるように、異分野との連携を行うツールとして注目されている。環境磁界の情報の伝達に非言語音を用いるだけでなく、環境磁界をソニフィケーションのための電力としても用いることを目指しているのが他者との大きな違いである。本装置の製作はコイル巻きやはんだごてを握ったことの無い、現代の学生へのものづくり教育にも効果的であり、研究室附属学生の導入研究としても活用している。

4.3 環境発電用エネルギー変換装置

環境磁界発電用エネルギー変換装置は、現在の技術に疑問・不満を投げかけるところから始まった研究開発である。エネルギー貯蔵技術には電気・磁気・運動エネルギーを用いる方法が良く知られている。代表的な実現例としてキャパシタ、SMES、フライホイールが挙げられる。一方、環境発電用のエネルギー貯蔵技術には電気エネルギーとしてキャパシタに蓄える手法以外例を見ない。エネルギー貯蔵と給電をシステムと考えた安価な装置を目標としている。エネルギー貯蔵には回転エネルギーを用いるが、高回転・大重量のフライホイールとは異なり kW 以上の電力をターゲットとしない[20]。Fig. 14 は環境発電用エネルギー変換装置のコンセプトを示す。「何のために役に立つのですか?」、3 年間担当した学生の研究当初の発言を鮮明に覚えている。彼は最終的に修士卒業までの研究成果で AEM 学会論文賞を含め 3 つの受賞を受けた。それを引き継ぐ学生も修士 1 年の前半まで同じ発言をしていたのは興味深い。この研究は医療分野の共同研究として全く別のスピンオフを生み出そうとしている。

4.4 移動体の活動制御

「君は飛行機と車どっちが好き?」。これからの日本を背負っていく研究室学生には是非興味を持ったことをやってもらいたいと始まったのがこの研究である。自動車や航空機等に代表される移動体の電動化は、持続可能な社会実現への重要な技術要素の一つである。2020 年まで自動運転システムを実用化させることを発表した日産自動車や、2015 年に国内初となる航空機用電動推進システムの有人飛行実験を成功した JAXA による報告[21]からもその重要性がうかがえる。一方、今から 20 年前に発表され、2015 年映画化もされた東野圭吾「天空の蜂」でも問題提起されていた通り、移動体の電動化技術と持続可能な社会実現には諸刃の剣

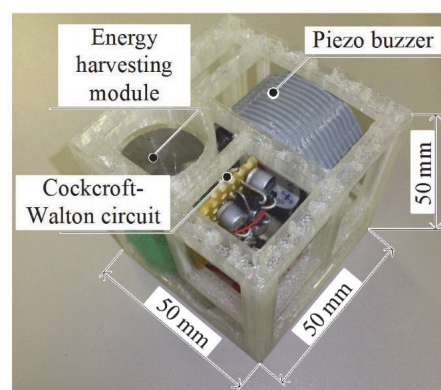


Fig. 13 Magnetic field alarm [18].

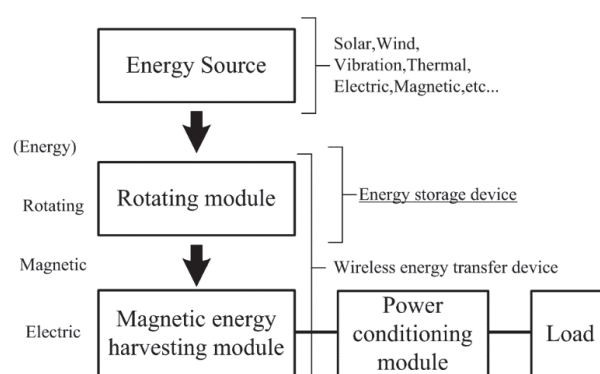


Fig. 14 Concept of energy converting device.

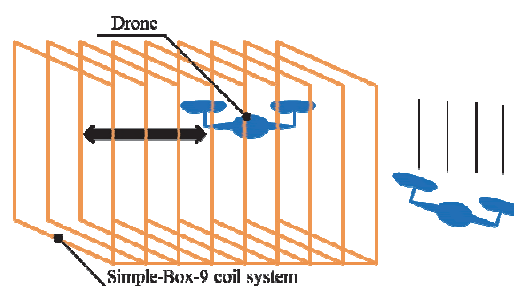


Fig. 15 Concept of activity control of movable bodies .

の関係がある。アメリカでは 2001 年からの 10 年で 418 件もの事故があったと報告されている[22]。そのため、国民の目線では Drone への期待に比べ、世界中で多発する様々な事故が印象付けられている。これは Drone を含む移動体への法規制だけでなく、安全走行・飛行をガイドする 2 重 3 重の安全装置を整備する使命があると考えられる。Fig. 15 に移動体の活動制御のコンセプトを示す。環境磁界発生領域でのみ移動体が活動でき、その領域を離れるとハードウェア的に移動体の活動を停止させる例を示している。環境磁界発電による発電する部品により、電池を用いないパワーセンサ・スイ

ッチを装荷したゼロパワーコントローラの提案準備を進めている[23]。

5 結言

環境磁界発電プロジェクトは 34 歳から 74 歳という幅広い年齢層、個性的なメンバー 10 名によって支えられている。2014 年度はホームページの製作[7]、2015 年はプロジェクトメンバーで本を執筆した[24]。なにより会議（飲み会）の日程調整には即日回答するメンバーの存在がプロジェクト最大の成果だと自負する。ここでは取り上げることのできなかったが、この会議から生まれたスピノフ研究もいくつかある。2015 年 12 月、年齢層の幅をさらに拡大する 8, 10, 12 歳の世界一若いバンドとのコラボを決めた。Fig. 16 に MADONIC の新聞記事を示す。「具体的に何をやるか?」、2012 年 6 月のプロジェクト立ち上げ時と同じ問いを、次の第 19 回会議で議論予定である。次の世代を牽引する若い人たちに渡せる何かを見つけ、無理せず楽しみながら（不苦勞：ふくろう）行動に移していく予定である。

参考文献

- [1] ICST2015 ホームページ
<http://seat.massey.ac.nz/conferences/icst2015/>
- [2] enocean 日本語ホームページ
<https://www.enocean.com/jp/>
- [3] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", *Science*, Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [4] ICNIRP, Guideline for limiting exposure to time-varying electric and magnetic field (1 Hz to 100 kHz), *Health phys* Vol.99 No.6, pp.818-836, 2010.
- [5] 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.
- [6] EMRP(e-news, Issue 5, Winter 2012)
http://projects.npl.co.uk/energy_harvesting/
- [7] 信州大学環境磁界発電ホームページ
<http://www.shinshu-u.ac.jp/project/kankyojikai/>
- [8] 篠原真毅（監修）、田代晋久（他 18 名分担執筆）、"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—", 科学情報出版, 2014.
- [9] 「坂城スマートタウン構想」普及啓発ビデオ
http://www.town.sakaki.nagano.jp/smarttown/smarttown_movie/index.html
- [10] 進化型解探索フレームワークのグローバル研究
<http://www.shinshu-u.ac.jp/project/shindai-zuno/>
- [11] ミドリ電子
<http://www.midori-electronics.com/service2.html>



Fig. 16 MADONIC, the youngest band in the world.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] K. Tashiro, G. Hattori, and H. Wakiwaka, "Magnetic flux concentration methods for magnetic energy harvesting module", *EPJ Web of Conferences*, 40, 06011, 2013.
- [15] 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.
- [16] 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—, 第 23 回 MAGDA コンファレンス論文集, pp. 427-432, 2014.
- [17] 細野敏夫, “メタ電磁気学”, 森北出版, 1992.
- [18] K. Tashiro, A. Ikegami, S. Shimada, H. Kojima, and H. Wakiwaka, “Design of Self-generating Component Powered by Magnetic Energy Harvesting—Magnetic Field Alarm”, *Springer, Next Generation Sensors and Systems, Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, 16:311-330 2015.
- [19] 新井葉, 中村振一郎, 井出祐昭, “分子の音 身体の中のシンフォニー”, 毎日新聞社, 2013.
- [20] 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・非接触給電システムの設計", *日本 AEM 学会誌*, Vol. 23, No. 1, pp. 93-98, 2015.
- [21] 航空機用電動推進システム/ハイブリッド推進システム
<http://www.aero.jaxa.jp/research/frontier/feather/>
- [22] The Washington Post 記事(2014 年 6 月 20 日)
<http://www.washingtonpost.com/sf/investigative/2014/06/20/w-hen-drones-fall-from-the-sky/>
- [23] 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.
- [24] 田代晋久（監修）、佐藤敏郎, 水野勉, 曾根原誠, 宮地幸祐, ト穎剛, 脇若弘之, 生稲弘明, 中澤達夫, 笠井利幸, "環境磁界発電の原理と設計法", 科学情報出版, 2016.