

放送通信用電波からの エネルギーハーベストに関する定量調査

川原 圭博^{†1} 塚田 恵佑^{†1,*1} 浅見 徹^{†1}

環境中に設置したワイヤレスセンサネットワークを長期間稼働させるためには、その間の電源を確保しなければならない。これまでに多くのセンサネットワークシステムの研究が提案され、ハードウェアだけでなく、通信プロトコルやOSなどのソフトウェアによる消費電力の削減に向けた取り組みが行われてきた。この一方で、人間が生活する環境中には、電子機器が発するノイズや放送通信に使われる電波など様々な電磁エネルギーが空中に放射されている。本論文では、こうした環境中に存在する放送通信用電波から得た数百 μW の電力をセンサノード駆動のためのエネルギー源として利用することを提案する。そして、このコンセプトの実現性の検証を目的とし、東京都内における実際の生活環境中の放送通信用周波数帯の電界強度を測定し、これから再生可能な電気エネルギーの最大値の見積りについて報告するとともに、レクテナを試作しTV放送用の電波から電子回路の駆動に十分なエネルギーを得られたことを報告する。

Quantitative Analysis of Energy Harvesting from Broadcasting and Communication Radiowave

YOSHIHIRO KAWAHARA,^{†1} KEISUKE TSUKADA^{†1,*1}
and TOHRU ASAMI^{†1}

Energy supply is one of the main concerns for long-term operation of Wireless Sensor Networks deployed in a real environment. Quite a few research activities have been proposed in respect to energy saving technology of both hardware devices and software technologies including communication protocols. In our living environment, various electro magnetic waves including communication radio wave and noise from electronic devices exist. In this paper we propose to harvest electrical energy of hundreds μW from such energy sources to power sensor network nodes. To assess the feasibility of this approach, we report measurement results of electrical field strength of several frequency bands under our

daily living environment. Then we estimate the maximum amount of energy from these sources. Our prototype rectenna could generate sufficient energy for an electrical circuit from TV broadcasting signal.

1. はじめに

実世界における物流や安心安全な社会環境をもたらすキー技術としてセンサネットワークへの期待が高まっている。しかしセンサネットワークとは、いわば小型低コスト化した無線通信可能な計算機(センサノード)を生活空間中に「ばらまく」ことであり、その展開と運用にはそれぞれ大きなコストが発生する。展開コストとはセンサネットワークを構成するノードの価格であり、運用コストは、センサノードを常時稼働させるための電気エネルギー供給のためのバッテリー交換作業である。価格コストは半導体技術の進展により年々下降しているが、連続稼働に不可欠な膨大な数のセンサノードの定期的な電池交換については、ソフトウェア、ハードウェア双方からの研究が存在するものの、いずれも根本的な解決に寄与しているとはいいがたく、センサネットワークの産業展開への大きな障壁となっている。

エネルギーハーベストとは、周囲の環境中に存在する各種のエネルギーを収穫(ハーベスト)して、電力に変換する技術のことを指し、ユビキタスネットワーク向け端末の給電技術として俄に注目されている。環境中に存在するエネルギーには太陽光・熱エネルギー・振動エネルギー・風力・水力・潮力・電波など様々なものがあり、環境中に配置されたセンサノードがこうした環境エネルギーから電力を再生できれば、バッテリー交換の必要のない自律駆動可能なワイヤレスセンサネットワークを実現することが可能となる。

本論文では、これらのエネルギー源のうち、電波による給電技術に着目して議論する。人間が生活する環境中には、電子機器が発するノイズや放送通信に使われる電波など様々な電磁エネルギーが空中に放射されている。このうち、実際に放送や通信に利用されなかったエネルギーは最終的に熱エネルギーとなってしまっている。放送通信用の電波は、最も単純にはアンテナと整流回路さえ備えていれば電波から電気エネルギーを取り出すことができるため、情報通信機器であればほとんどコストアップすることなくエネルギーを回収すること

^{†1} 東京大学
The University of Tokyo

*1 現在、東京電力株式会社
Presently with Tokyo Electric Power Company

ができる。これは太陽電池や熱、振動などからのエネルギーハーベストにはない特徴的な点であり、センサノードを非常に低価格で連続稼働させるために最も都合が良い選択肢であるといえる。

本研究の最終的な目標は、人間の日常生活の中に存在する放送通信用電波から発せられる輻射電磁エネルギーを電力再生回路を用いて数百 μW 程度の電気エネルギーに変換し、この電力を電子タグやセンサネットワークなど、センサ搭載型超低消費電力計算機の駆動に用いるための基礎技術を確立することである。とはいえ、こうした「信号」や「ノイズ」をエネルギー源として利用するにはいくつか超えなければならない大きな壁が存在する。電磁波から電気エネルギーを再生するという意味では、既存のパッシブ型 RFID も同様の技術に立脚している。しかしパッシブ型 RFID と異なり、環境中の放送通信用電磁界は時間的・空間的な変動が大きいため、これをそのままバッテリーによるエネルギーの代替電力源として利用することは難しい。

そこで本論文では、こうしたコンセプトのセンサネットワークの実現可能性について初期的かつ定量的な議論を行うことを目的とする。まず、2章ではこれまでに存在するエネルギーハーベスト技術を振り返り、電波を用いたハーベスト技術の特徴について述べる。3章では、環境電磁界からのエネルギーハーベストを行うための原理とセンサノードの構成について述べる。4章では生活空間の電磁界の電界強度に関する時間的および空間的な変動を考慮した測定結果を示し、電力再生回路を構成するためのアンテナおよび回路構成技術の性能の明確化を行うための定量評価結果について論ずる。5章では、デジタルテレビ放送の周波数帯に最適化し試作したレクテナによる、東京タワー周辺での電力回収実験の結果を報告する。

2. エネルギーハーベスト技術

文献 1) では、エネルギーハーベスト技術をインフラからの給電でも、バッテリーの交換による給電でもない「第 3 エネルギー分野」と名付け、国内外での取り組みについて紹介している。本章では、代表的なエネルギー源の位置づけと、研究および実用化事例、そして獲得可能な電力の目安について述べる。

なお、どの程度の電力が得られればセンサノードを稼働可能かについては 5 章において詳しく議論するが、ここでは「数百 μW の電力が得られれば 1 秒に 1 回程度のセンシングとデータ送信が可能」であるという一定の指標に言及しておく。

2.1 光エネルギーを利用した発電

エネルギーハーベスト技術のうち最も代表的なエネルギー源は光であろう。光起電力効果を利用して太陽光エネルギーを直接電力に変換する太陽電池は、変換効率が規模によって変わらないため任意の規模での利用が可能で、センサノード向けの電源として有望である。文献 2) によれば、太陽光を利用した場合、およそ 100 mW/cm^2 の電力が得られ、また標準的なオフィスの照明からはおよそ $100 \mu\text{W/cm}^2$ の電力が得られると報告されている。我々がごく一般的に手に入る太陽電池パネルを評価した結果、5 cm 四方の大きさの太陽電池を利用した場合、6 月の東京の日中屋外 (95 klx) で 65 mW、一般的なオフィスの暗い場所 (100 lx) で $5.95 \mu\text{W}$ の発電量を得た³⁾。太陽光発電の課題の 1 つとしてあげられるのが、この発電効率の設置環境による変動である。こうした問題に対し、不安定な電源下でも電力状態に適応的に動作し、確率的にデータを配送するマルチホップ通信プロトコル SDDP (Simple Data Dissemination Protocol) が提案されている⁴⁾。ただし、SDDP においても適用領域は屋外を想定しており、屋内や、ウェアラブル機器や体内埋め込み型機器など、物理的な大きさや重さ、形状や材質が制限されることが多い環境では太陽電池は不利である。またセンサネットワーク向け技術は構成部品の単価が安いことも求められるが、半導体化合物からなる太陽電池は比較的高価な材料でありこの点でも今後の技術革新が必要とされている。

2.2 力学的エネルギーを利用した発電

環境中に存在する力学的エネルギーを大別すると、環境中の振動エネルギー、外部の物体との相対運動から得られるエネルギー、外部の流体との相対運動から得られるエネルギーに分けることができる。また、こうした力学的エネルギーを利用した発電原理としては、電磁誘導方式 (永久磁石かコイルの振動・回転に由来した磁束の変化にともなう誘導起電力を利用する方式)、圧電方式 (PZT など圧電材料にストレスを加え、電力を利用する方式)、そして静電誘導方式 (帯電させた電極間の距離を外力により変化させ電力を得る方式) がある。人の歩く動きをうまく利用し、靴に内蔵した発電機から 250 mW を得た事例⁵⁾ や床に敷いたマットから 0.1–0.3 W の電力を発電する研究事例および商用化に向けた試み⁶⁾ が存在する。しかしながらこれらは、動きをともなわないセンサネットワークノードの自律駆動には適合しにくい。

2.3 熱エネルギーを利用した発電

太陽熱、地熱、動物の体温、機器や工場からの廃熱といった熱源と環境の温度差からエネルギーを回収することができる。しかし温度差から回収できるエネルギーはカルノー効率に

よりその最大効率が理論的に決定される．高熱源の温度を T_H (K), 低熱源の温度を T_L (K) とすると, カルノー効率 η は式 (1) で表される．

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1)$$

よって T_L が決まっている場合には T_H が大きいほうが (温度差が大きいほうが) 効率は良くなる．実際には, 熱電素子ではさらに無視できないほどの損失が存在し, システムとしての現実的な効率は 200°C と 20°C の温度差では 10%, 40°C と 20°C の温度差では 1% 程度の変換効率になる²⁾. Bi_2Te_3 熱電素子を用いた製品 (Applied Digital Solution, Thermo Life) では, 5 度の温度差で 3V, $10\mu\text{A}$ ($30\mu\text{W}$) の電力を得られている．

2.4 環境電波からの電力再生

環境にある電磁エネルギーを電気エネルギーに変換する技術はその性質からいくつかに分類することができる．

NEC では, 蛍光灯から発生する電磁ノイズから最大 250mW のエネルギーを得て電子タグを動作する製品を開発している⁷⁾. また, Patel らは, 家庭内で電気製品をオンオフする際に電力配線に生じるノイズに着目し, 電力配線から漏れ出る電磁ノイズで宅内の RFID を動作させることの可能性について論じている⁸⁾. これらの技術が利用するエネルギー源は近傍電磁界と呼ばれ, 発生源から距離が離れるにつれ急速に減衰するため広い面積をカバーすることが非常に困難である．

これに対し, 篠原ら⁹⁾, 澤田ら¹⁰⁾, Kurs ら¹¹⁾ は電波による電力伝送を目指した研究開発をしている．無線電力伝送は, 従来宇宙空間で太陽光発電したエネルギーを地球に送電するための技術として活発に研究されてきたが, 昨今では地上において小型の電子機器の駆動を意識した研究および製品も登場している．Powercast 社の Powerharvester¹²⁾ は, 宅内に電力送信機を配置し, 宅内のリモコンなどに数百 μW の電力を送る仕組みを提供している．Intel の WARP も同様に環境中の電波からエネルギーを得ている¹³⁾. これらは遠方電界を利用しているため, 適切なアンテナを用いて比較的長い距離を伝播させることができ, 広い範囲をカバーすることが可能である．

電波は共有資源としての性質が非常に強く電界強度は規制により細かく制限されているため給電のみを目的として環境中に強い電磁界を発生させることは社会的な困難さもともなう．このことの裏返しとして, 環境中に存在する放送通信用電波は, 人間が活動する空間において広い領域をカバーするように設置されている．これから得られるエネルギーが十分であれば, センサネットワークなど, 広範囲に展開するアプリケーションのためのエネル

ギー源として魅力的であるといえる．

3. 環境電磁界からのエネルギーハーベストアーキテクチャ

本章では, 環境電磁界から動作に必要な電力を得て, 低消費電力な電子機器を動作させるための原理とシステム構成について述べる．

3.1 電波からの電力・電圧再生の原理

入力インピーダンス Z のアンテナの給電点を開放して到来電波の中に設置すると, 受信開放電圧 V_0 がアンテナの端子に誘導される．このアンテナの端子に任意の負荷 Z_l を接続すると電流 I が流れ, それに対する端子電圧 $V_t (= Z_l I)$ が発生する．このときの関係式は次のように表すことができる¹⁴⁾．

$$V_0 - ZI = Z_l I \quad (2)$$

したがって負荷に流れる電流は

$$I = \frac{V_0}{Z + Z_l} \quad (3)$$

で与えられる． V_0 は到来電波には関係するが負荷 Z_l には無関係である．すなわち, 受信アンテナは起電力 V_0 , 内部インピーダンス Z の電源と等価であると見なすことができる．このときアンテナから負荷 Z_l に取り出しうる最大電力を考えると, 式 (2) から明らかなように Z_l が Z の複素共役数のとき, すなわち共役整合のとき負荷電力は最大となり, このときの電力を W_a とすると,

$$W_a = R \left| \frac{V_0}{2R} \right|^2 = \frac{|V_0|^2}{4R} \quad (4)$$

となる．なお R は入力抵抗であり, 入力インピーダンス Z の実部である．この W_a を受信最大有効電力と呼ぶ．到来電波の電界ベクトルを E [V/m], 波長を λ [m], アンテナの絶対利得を G_a (真値) とすると, 受信最大有効電力 W_a [W] はまた次の式で表すこともできる．

$$W_a = \frac{\lambda^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} G_a |E|^2 \quad (5)$$

一般に, 送信アンテナからの高周波の出力基準値は「電波防護指針¹⁵⁾」で許容電界強度が定められており, 10k–3MHz (AM ラジオ放送など) は 275 V/m, 30–300MHz (FM や TV 放送など) が 27.5 V/m, 1.5–300GHz (無線 LAN や携帯電話などが含まれる) は 61.4 V/m である．したがって, 単なる送信アンテナの出力基準値から考えれば, AM ラジオ放送が最適エネルギー源となる．また, 同じ電界強度で得られるエネルギー量は波長が長

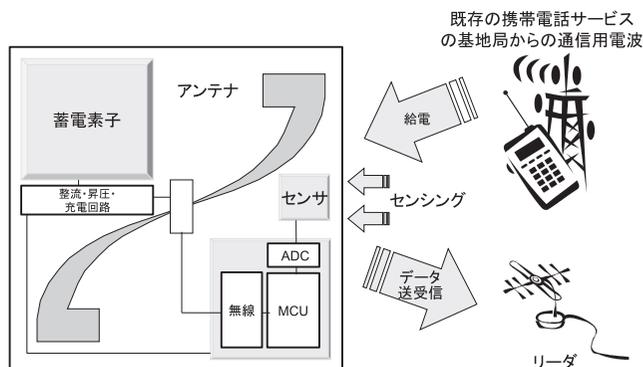


図 1 想定するセンサノードのアーキテクチャ

Fig. 1 Architecture of the assumed sensor node.

いほど大きくなるので、この意味でも AM ラジオ放送が有利である^{*1}。ただし、受信アンテナの実効サイズは、1 MHz と 1 GHz では 1,000 倍ほどの差があることから、この周波数帯でコンパクトな給電装置を実現できるとは一概にはいえない。そこで本論文では対象とする周波数を 75 MHz–3 GHz に絞る。

3.2 回路構成技術

図 1 に本研究が想定するエネルギーハーベストによるセンサノードのデバイス構成を示す。通常のセンサノードは、現象を観測するセンサ（アプリケーション依存）、そして、MCU および AD 変換器や無線インタフェース、通信用アンテナ、蓄電素子から構成される。これに加え、本研究で想定するノードでは、通信だけでなく電力の獲得にもアンテナを用いる。受信アンテナにおいて到来電波から再生できる電流は交流であるので、実用的には直流電流への変換を行う必要がある。アンテナと整流回路を組み合わせたものをレクテナと呼ぶ。従来、大電力用のレクテナでは高効率のものが存在するが、1 mW 程度では 10% 程度の効率しか得られなかった。近年では研究が進み、低入力でも高効率を実現するレクテナも開発されている¹⁶⁾。また、レクテナにより得られた電圧は回路素子への入力電圧としては低すぎるため、これを昇圧する回路も必要である。能動素子を利用した DC–DC コンバータは電子機器内部で多く使われているが、1 V 以下の低い電圧では動作しないものや効率が低いものが多く、低い入力電圧でも動作するように特殊な起動用 IC を用いたりするといった工夫

*1 鉱石検波器と同調回路だけからなる鉱石ラジオが、電源なしに動作するのはこのためである。

が必要になる¹⁷⁾。

電波からのエネルギー供給に限らないが、エネルギーハーベストでは、得たエネルギーを有効に利用するために、蓄電素子を用いて電気エネルギーを一時的に蓄積して利用する。

既存の MCU やセンサ、無線通信モジュールの最大消費電力は数十 mW 程度である。しかしながら、センサネットワークのアプリケーションによっては間欠動作で事足りるものも多い。そこで、通常は数 μ W 程度の電力で待機動作するか、MCU を完全に停止、必要なときのみ極短時間だけセンシングや通信を行うような利用を想定する。

このセンサノードが、どのようなデータリンクプロトコルおよびルーティングプロトコルを用いてネットワークを構成するかといった上位層の挙動に関する議論は、紙面の都合から本論文では控える。

4. 環境電磁波の時空間モデルの作成

日常生活空間に、どのような周波数の電磁界がどの程度の強度で存在しているか、詳細に分析したデータは意外に少ない。特に、携帯電話基地局からの電界強度を問題とする場合、絶対値だけでなく、他の周波数帯の強度との相対値も絡めた議論が重要であるが、公開資料にはこの観点からは不十分なものが多い。また、これまでのような定点観測では移動物体に設置されたセンサへの給電を論ずることもできない。したがって、放送通信電波を資源としてとらえ、環境電磁波の時間的な変動と空間的な分布について定量的に調査を行うことは非常に重要である。

レクテナを用いてテレビの放送波から電力を回収する試みは文献 13) においても報告されているが、時間的、空間的変動を含めた議論という意味では資料として不十分であった。そこで、東京都心部における典型的な生活環境を想定し、(1) おおよその日常生活をカバーする時間や場所、周波数に加え、(2) その中でも最も条件が良いと考えられる特定の場所、周波数における放送通信電波の最大強度の測定を実施した。具体的にはアンテナ校正済みのポータブルスペクトラムアナライザおよび GPS を携帯し、屋外、屋内を含む東京都内の複数の箇所において、75 MHz から 3 GHz までの電波に関して 1 秒ごとの電界強度の変化を約 1 カ月にわたって記録した。この記録をもとに、国内の各通信事業社に割り当てられた携帯電話周波数帯電波について、電界強度の日ごとの値のばらつき、信号レベルの持続率を実測により求めた。さらに、FM ラジオ帯およびデジタル TV、アナログ TV 帯の電波については、東京タワーを起点とした周囲環境の定点測定を行った。

4.1 測定条件

電界強度の測定には、Narda 社製スペクトラムアナライザ SRM-3000 を利用した¹⁸⁾。75 MHz から 3 GHz の周波数レンジに対して 3 軸の等方性測定が可能である。プローブと本体のスペクトラムアナライザはアンテナファクタを校正済みであるため、絶対値による正確な電界強度測定が可能である。また測定は時間ごとに周波数ごとの電界強度を逐次保持する ACT モードで行った。3 軸測定モードの場合、SRM-3000 はまず電界の x 軸成分を 75 MHz から 3 GHz まで順に測定していく。この際、RBW (resolution bandwidth) を細かく指定するほど細かい周波数ごとの電界値が保持される。 x 軸成分を測定し終わると次に y 軸成分、最後に z 軸成分を同じく 75 MHz から RBW 刻みで 3 GHz まで測定し、最後に各周波数ごとの電界ベクトルの絶対値をとってモニタに電界強度として表示する。このすべてのサイクルに費やす時間が掃引時間として表示されており、おおよそ 1-3 秒ごとに結果を得ることができる。RBW を粗くするほど、また測定周波数範囲を 75 MHz-3 GHz より狭めるほど掃引時間は短くなるが、各方向成分の測定と絶対値計算に要する時間の比は公開資料からは不明である。したがってサンプルされた各周波数の測定間隔より短い時間での変動は、今回の実験では明らかではない。本論文ではこれ以降、約 1 秒程度の掃引時間中、観測された電界強度がつねに持続しているものとして取り扱う。この条件はテレビ・ラジオの放送波などでは良い近似が得られるだろうが、携帯電話など、持続時間がミリ秒オーダーの電波については誤差が生じる可能性がある。

4.2 広域調査

どのような場面において、どの程度の強度の電波が、どの周波数帯において放射されているのか、そしてそれがどのような時間的変動を示しているのか大局的な情報を収集するために東京都心部において 19 日間同時刻に同一地点での測定を繰り返した。表 1 に測定スケジュールの詳細を示す。測定ルート上の各ステージにおいて、75 MHz-3 GHz までの電界強度を RBW = 5 MHz で測定した。

図 2 に、測定結果の一例を示す。グラフは、 x 軸に周波数 (GHz)、 y 軸に経過時間 (秒)、 z 軸に電界強度 (V/m) をとっている。以降、橙および赤の平面は電界強度がそれぞれ 0.5 V/m および 1.0 V/m の平面を示している。なお、0.5 V/m は、530 MHz (デジタルテレビ) で約 $50 \mu\text{W}$ 、2.1 GHz (携帯電話) で約 $3.4 \mu\text{W}$ 、1.0 V/m は、530 MHz で約 $200 \mu\text{W}$ 、2.1 GHz で約 $14 \mu\text{W}$ の電力を期待できる電界強度である。

4.2.1 周波数ごとの特徴

図 2 から分かるように、継続的に十分な強度の電波が観測されるのは特定の周波数帯域

表 1 測定スケジュール

Table 1 Measurement schedule.

時刻	行動	場所	時間	時刻	行動	場所	時間
7:15	自宅から駅	目白駅	13 min	13:50	仕事	研究室	4 hours
7:28	電車を待つ	池袋駅	6 min	17:50	研究室から駅	本郷通り	19 min
7:34	乗車	山手線	40 min	18:09	電車を待つ	本郷三丁目	2 min
8:14	乗り換え移動	東京駅	2 min	18:11	乗車	丸の内線	9 min
8:20	電車を待つ	東京駅	2 min	18:20	乗り換え移動	東京駅	6 min
8:22	乗車	丸の内線	9 min	18:26	電車を待つ	東京駅	2 min
8:31	駅からオフィス	本郷通り	19 min	18:28	乗車	山手線	40 min
8:50	仕事	研究室	4 hours	19:08	駅から自宅	目白	13 min
12:50	昼食	食堂	1 hour				

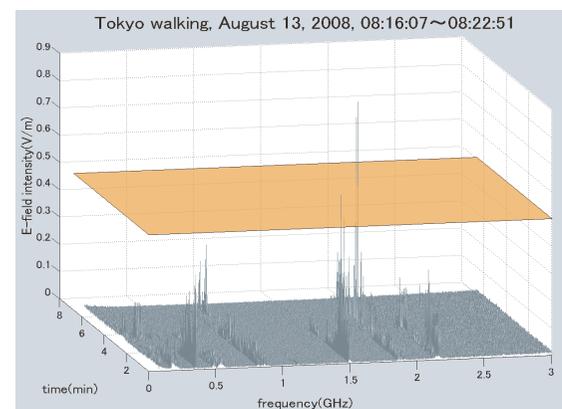


図 2 ある測定日における電界強度測定結果

Fig. 2 Measurement result of field strength.

においてのみであり、他の帯域では分布が確認できない。今回の測定中、ノイズではなく、一定の電界強度で信号が確認できたのは、500 MHz 以下、800 MHz 付近、1.5 GHz 付近、1.9 GHz 付近、2.1 GHz 付近、2.5 GHz 付近である。総務省の電波割当てに関する資料¹⁹⁾によれば、これらは、FM ラジオ (77.5-90 MHz)、アナログ TV 1-3ch (90-107.5 MHz)、アナログ TV 4-12ch (170-222 MHz)、デジタル TV (512-560 MHz)、携帯電話 800 MHz 帯 (810-957.5 MHz)、携帯電話 1.5 GHz 帯 (1,427-1,525 MHz)、3G 携帯電話上り (1,920-1,980 MHz)、3G 携帯電話下り (2,110-2,170 MHz)、無線 LAN (2,400-2,497 MHz) である。

ラジオ・テレビの放送波や、無線 LAN の通信用電波は場所によっては観測できないこともあるのに対して、携帯電話の電波、特に 800 MHz 帯と 3G 携帯電波は比較的場所を選ばずに存在していることが明らかになった。ラジオ・テレビの放送波は地下鉄の駅や電車内、食堂などでは観測されない。無線 LAN (2.4 GHz 帯) の電波の持続的な分布が確認できるのは、研究室においてのみであった。

4.2.2 時間変動

続いて、時間的変動を観察するために、 0.1 V/m^* をそれを超える電波について 1 日ごとの平均値 (Ave)、標準偏差 (Dev)、持続率 (Dur: 0.1 V/m 以上の電界強度が持続する時間の、測定時間に占める割合) の 3 つの指標を計算した。図 3 には各指標 (Ave, Dev, Dur) の 19 日間平均値と 19 日間標準誤差を 1 つのバーにまとめて示している (青および黄色が 19 日間平均値)。また各地点のグラフは上から FM ラジオ帯域 (77.5–90 MHz)、アナログ TV 帯域 (90–107.5 MHz および 170–220 Hz)、デジタル TV 帯域 (512–560 MHz)、携帯電話 800 MHz 帯 (810–957.5 MHz)、携帯電話 2 GHz 帯 (1,920–1,980 MHz および 2,110–2,170 MHz) の 5 つの帯域についてまとめてあり、帯域内に含まれる電波のうち電界強度が最大のものをもその帯域の代表値としている。

この結果からも、やはり携帯電話の電波はどの箇所でも一定強度で存在していることが分かる。ラジオ・テレビの放送波は、新橋駅、東京駅、本郷通りなど東京タワーから比較的近い場所において限定的に観測された^{*2}。総務省によれば携帯電話の基地局数は関東圏でテレビ放送局数の約 30 倍にもなる²⁰⁾。持続率は放送波より小さく、電界強度が刻々と変化することが分かる。

一方、放送波は持続率が高く安定性が高い。携帯電話の電波は確かにどの地点でも存在しているが、日ごとの値のばらつきが大きい。それに比べて、山手線の新橋駅付近において顕著であるように、FM ラジオ帯およびアナログ TV 帯の電波は、日ごとの値のばらつきが携帯電話の電波より小さい。これは東京タワーの付近を通過する際に放送波を受信したためだと考えられる。分布の範囲こそ限られるものの、放送波は一般的に、通信時しか電波を発しない携帯電話とは違い、つねに電波を放射しているため、エネルギーハーベストは携帯電話の電波より容易になると考えられる。

*1 0.1 V/m は、本研究で実装を考えるレクテナの起動に必要な最低電界強度である。

*2 ただし、閾値 0.1 V/m としてそれ以上の電波のみを解析しているので、グラフで電界強度 0 の地点でも 0.1 V/m 未満の電波は存在している。

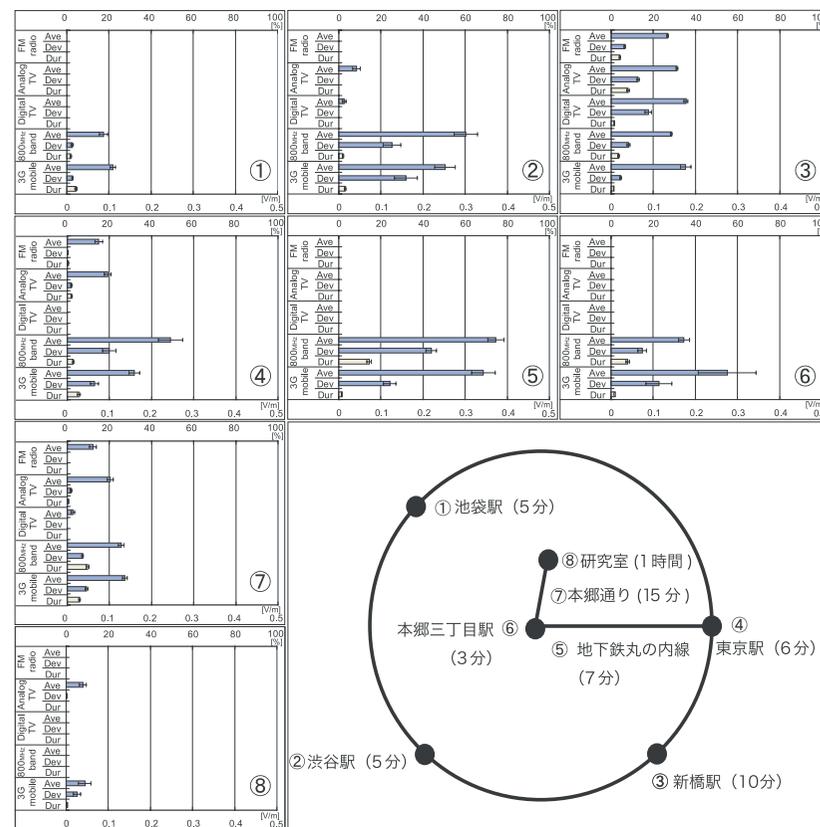


図 3 場所ごとの電界強度

Fig. 3 Field strength at each measurement point.

4.3 特定地点における詳細調査

本節においては、前節の結果をふまえ、特に強い電波が期待できる地点における詳細調査結果について述べる。

4.3.1 渋谷八公前

携帯電話は利用者が密集する場所においてより高い電界強度を記録したため、前節の広範囲の調査に続き、特に強い電波が期待できる地点として、渋谷八公前を選択して電波分布

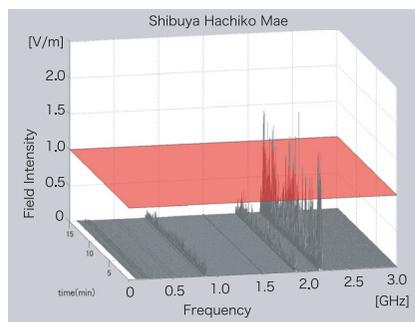


図 4 渋谷ハチ公前における電界強度
Fig. 4 Field strength at Shibuya Hachiko Mae.

調査を行った．当該地点は待ち合わせ場所として有名であり，多くの人が携帯電話を同時に利用する場でもある．特に混雑度が増すと思われる週末の1日の夕方から夜にかけての時間帯を選択し，15分間の測定+5分間インターバルのサイクルを計5回繰り返した．なお，前節の広域調査ではRBW = 5 MHzとしていたが，より詳細な調査のためにRBW = 2 MHzに精度をあげて実験を行った．

図 4 に示すのは，ある1サイクルにおける渋谷ハチ公前の電波分布である．3G 携帯電話下り周波数帯域 (2,110–2,170 MHz) に，前節の広域調査で観測された携帯電話用電波と比較して，明らかに強い電波の持続的な分布が観測された．800 MHz 帯と3G 携帯電話上り周波数帯域 (1.9 GHz 帯) には比較的強度の低い電波の持続が確認できる．図 5 は周波数ごとの電界強度をより詳細に表示した結果である．この電界強度は測定時間中の最大値を示している．これによると，1.85–1.95 GHz に比較的強度の低い電波が，2.15 GHz 付近に強度の高い電波が確認できる．前者は e-mobile 下り (1,854.9–1,859.9 MHz)，FOMA 下り (1,864.9–1,874.9 MHz)，PHS (1,884.5–1,919.6 MHz)，3G au 上り (1,925–1,940 MHz)，FOMA 上り (1,945–1,960 MHz)，Softbank 3G 上り (1,965–1,980 MHz) である．後者は下り周波数帯域で，3G au 下り (2,115–2,130 MHz)，FOMA 下り (2,135–2,150 MHz)，Softbank 3G (2,155–2,170 MHz) であると考えられる．なかでも強い電界強度を示しているのは Softbank 3G と FOMA の下り周波数帯域であり，特に Softbank 3G 下りの電波は 1 V/m を超えている．この2つの帯域について，5 サイクルの各平均値と標準誤差と持続率を図 6 で示したのが図 6 である．なお，前節同様に閾値を 0.1 V/m としてそれを超える電波についてのみ平均・標準誤差・持続率を計算しており，帯域内に含まれる電波のうち電界強

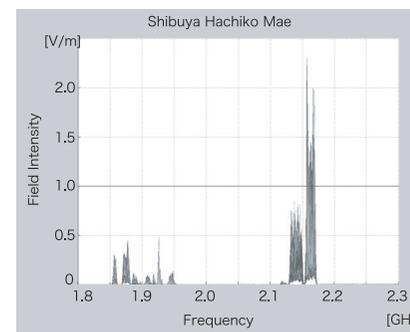


図 5 1,800–2,300 MHz の電界強度最大値
Fig. 5 Maximum field strength between 1,800–2,300 MHz.

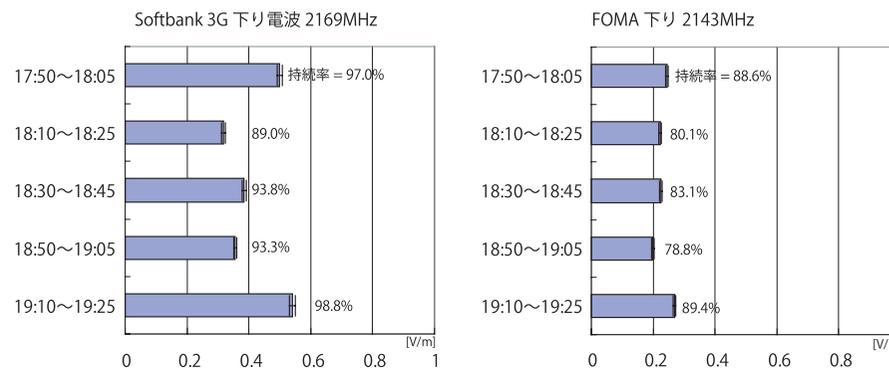


図 6 Softbank 3G 下り (左) と FOMA 下り (右) における電界強度
Fig. 6 Field strength of Softbank 3G downlink (left) and FOMA downlink (right).

度が最大のものをその帯域の代表値としている．平均値と標準誤差は1つのバーにまとめて図示しており，持続率は数値として示してある．前節の実験と違い1日限りの測定であるので，日による指標のばらつきは考慮されていない．

電界強度の持続率について着目すると，図 3 では最大でも 10% 程度であったのに対し，FOMA では 15 分の測定時間のうち 8 割強，Softbank 3G では 9 割強の時間，0.1 V/m を超える電波が持続していることになる．人で混雑している場所ほど携帯電話端末と無線基地局間の通信頻度が高いことが直感的に予想されるが，この結果はそれを数値で示したことに

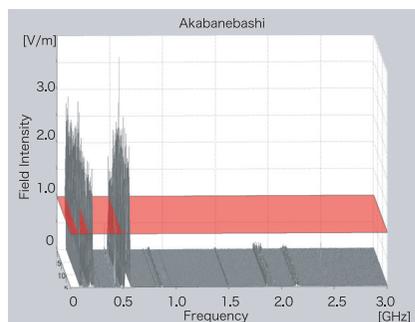


図7 赤羽橋交差点における電界強度(時間変動)
Fig.7 Measurement result at Akabanebashi (Act.).

なる。

ただし、前述のとおり今回の実験では観測された電波はつねに掃引時間中(最大精度1秒単位)持続しているものとして取り扱っているが、携帯電話の電波においては電波の持続時間はミリ秒単位である。たとえばW-CDMAの場合10ミリ秒単位でユーザや転送フォーマットの切替えを行っており、送信電力制御はさらに細かい時間で行われ0.67ミリ秒ごとに電力が変わる可能性がある。CDMA 2001x-EVDOの場合は電波の持続時間単位は1.67ミリ秒で、電力制御は1.25ミリ秒で行われる。そのため今回の測定で計算した持続率は、携帯電話の電波の場合、大小の程度を比較することに使うことはできても、数値そのものに意味を持たせることはできない。

4.3.2 東京タワー周辺

東京タワー周辺のいくつかの地点において15分間の電波測定を行った。渋谷八公前同様に、RBW = 2 MHzとしている。

図7、図8に示すのは、東京タワーから300mほどの地点である、赤羽橋交差点における測定結果である。これまでの測定では観測されなかった非常に強度の高い電波の持続的な分布が観測された。周波数別に詳しく見ると、FMラジオ帯(77.5-90 MHz)、アナログテレビ帯(90-107.5 MHzおよび170-222 MHz)、デジタルテレビ帯(512-560 MHz)にあたる周波数帯域で強い電波が観測されている。

図9には全測定地点における測定環境の詳細、および解析結果をまとめて示す。閾値を0.1 V/mとしてそれを超える電波について平均値と標準偏差を計算し、1つのパーにまとめて図示している。結果はFMラジオ帯域、アナログTV帯域、デジタルTV帯域の3つに

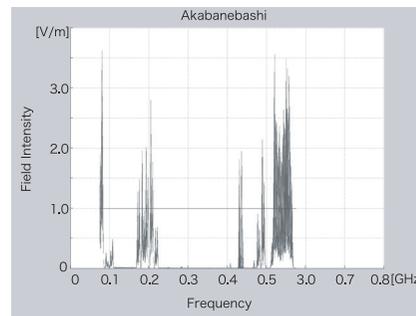


図8 赤羽橋交差点における電界強度測定結果(最大値)
Fig.8 Field measurement result at Akabanebashi (Max.).

ついてまとめている。持続率はどの地点でもほぼ100%だったため省略している。

理論的には電界強度は送信源からの距離に反比例する。FMラジオ帯では、東京タワーからの距離が離れるほど理論通り電界強度は小さくなっているが、他の帯域では必ずしもそうではない。周波数の低い電波は回折しやすく建物の影響を受けにくいことや、そもそもTVアンテナがラジオアンテナよりかなり高い位置にあるため東京タワーの足元ではかえって電波が届きにくいことなどが原因と考えられる。地点7と地点8の結果からも、低い周波数ほどビルによる遮断の影響が小さいことがうかがえる。

見通しが良く適切な距離の地点においては、安定的に1 V/m以上の電波が持続している。特に地点1では2.5 V/m近い強度の電波が15分間の測定中つねに継続するなど、電力源として期待できる。

4.4 東京都内の電波分布に関するまとめと考察

測定調査の結果、東京都内に分布している電波は、大きく分けて2種類であることが分かった。1つは持続時間がミリ秒単位と短いが、基地局の設置間隔が密であるため都内であれば比較的どの地点でも一定強度の電界が観測できる携帯電話用通信電波(800 MHz帯、1.5 GHz帯、1.9 GHz帯および2.1 GHz帯)。他方、一定強度以上の電波が観測される場所は送信アンテナからの距離や伝搬経路などの条件により限定されるが、電波そのものは常時放射されており電界強度の時間変動が小さい放送用電波(FMラジオ、アナログTV、デジタルTV)。その他、無線LANやPHSなどの電波が局所的に観測されたが、電界強度や持続時間において携帯電話用電波や放送用電波に及ぶものではなく、エネルギーハーベスティングという観点から考えると優先的に取り上げるものではない。

エネルギー源としての観点から、携帯電話用電波と放送用電波どちらが有利かについて議論する。まず携帯電話の電波であるが、測定結果を参考に、2,169 MHz で 0.42 V/m の電界強度が観測されたと想定した場合、最大でどの程度の電力が得られるのかを式 (5) から計算すると、 $2.25 \mu\text{W}$ である。一方放送用電波として、図 9 の地点 2 における実験結果を参考に、546 MHz で 1.76 V/m の電界強度が観測されたと想定した場合、最大で $624 \mu\text{W}$ の電力が得られる計算となる（なお、どちらの計算においてもアンテナ利得 = 5 dB とした）。

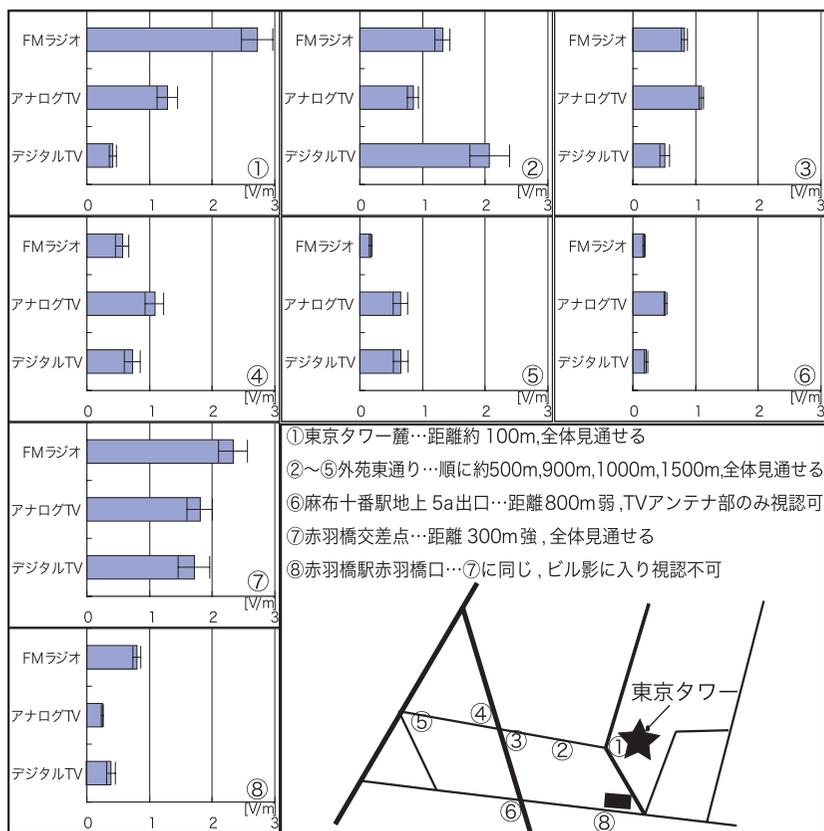


図 9 東京タワー周辺の電界強度測定結果
 Fig. 9 Field measurement result at Tokyo Tower.

式 (5) より電界強度が大きいほど、また周波数が低いほど大きな電力が得られるのは明らかであるが、実際の電波分布に基づいて計算を行った場合エネルギー源としては 100 倍以上の差があることになる。また電波の持続時間に関しても、前述のとおり携帯電話は持続時間がミリ秒単位であるためつねに計算した電力が得られるとは限らず、出力の安定性の点でも放送用電波に劣る。

携帯電話用電波のエネルギー源としての長所は、実験結果からも分かるように分布が広範囲に及んでいることであろう。また、周波数が高いほど実効アンテナのサイズを小さくできるという利点もある。ユビキタスネットワーク向けの技術であることを意識した際には分布が広範囲に及んでいることは有利であるし、ワイヤレスセンサネットワークノードに実装することを想定するならば実効アンテナのサイズは小さければ小さいほど取り回しの点で有利である。電源としての出力面では放送波に劣るが、アプリケーションにより大きな可能性を見出すことができるのが携帯電話用電波のエネルギー源としての特徴であるといえる。

5. エネルギーハーベスト回路の構成と電力再生実験

エネルギーハーベストの実現性を確かめるため、デジタルテレビ帯の平板アンテナに整流回路を取り付け、実際にエネルギーの回収実験を行った（図 10、図 11）。

5.1 実装

アンテナ部分には八木アンテナ株式会社から一般に発売されている UwPA を用いた。広い指向性角度を有するため方向調整が簡単で、かつ UHF テレビ帯 (470-770 MHz) 全帯域において 4.5-5 dB の安定した受信性能を有している。整流回路は図 11 に示す、半波倍圧整流回路を用いた。

5.2 実験方法

実験を行った東京タワー周辺環境の 8 つの地点（図 9 参照）で、レクテナ回路出力端に



図 10 評価実験用試作レクテナ外観
 Fig. 10 Appearance of an experimental rectenna.

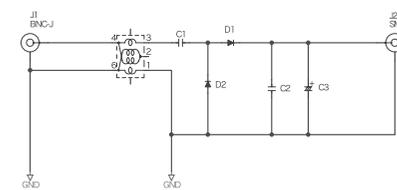


図 11 レクテナ回路図
 Fig. 11 Circuit of rectenna.

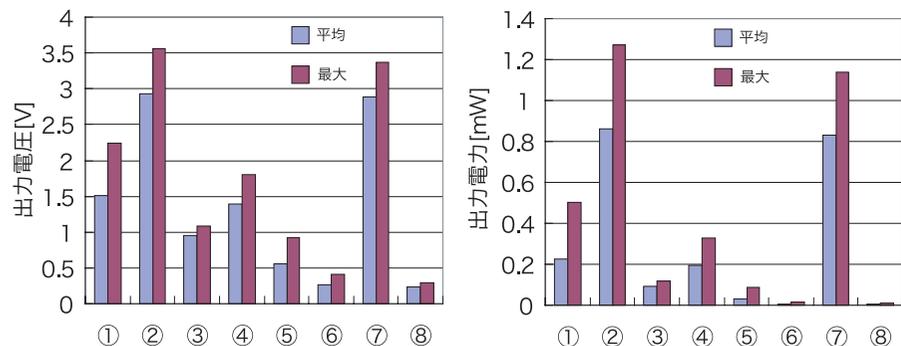


図 12 東京タワー周辺 8 地点における、レクテナ出力電圧と出力電力

Fig. 12 Rectenna output voltage and power at 8 points near Tokyo Tower.

挿入した負荷電圧の測定実験を行った。出力端に挿入した抵抗は $10\text{ k}\Omega$ で、その両端の電圧をデジタルマルチメータで測定した。測定は各地点 5 分間行い、電圧の最大値と 5 分間の平均値を測定により求めた。

5.3 実験結果

図 12 に測定結果を示す。図は赤の系列が最大値を、青の系列が平均値を示す。2 の地点と 7 の地点で大きな再生電力が記録されている。2 の地点では平均 $860\ \mu\text{W}$ 、最大 1.3 mW の電力が、7 の地点では平均 $830\ \mu\text{W}$ 、最大 1.1 mW の電力が得られた。また電圧に関しても、両地点ともに 3 V 程度の負荷電圧が得られている。電圧および電力の大小は、図 9 の各地点におけるデジタル TV の電界強度の大小にほぼ対応していることが見て取れる。

一般的なセンサノードは非通信時の待機電力は数 μW 、センシングおよび、通信時にはバースト的に数 mW から数十 mW 程度の電力を消費する。たとえば三菱電機の情報技術総合研究所が RF WakeUp 方式と呼ばれるセンサノードの動作方式の評価に用いた試作ノードでは非通信時の平均消費電力は $689\ \mu\text{W}$ である²¹⁾。市販の低消費電力 MCU である Texas Instruments 社の MSP430 を用いた、低消費電力型の無線センサネットワーク開発キット (eZ430-RF2500T) を用いて「温度を 1 回計測し、基地局に送る」というタスクについて、1 サイクルの消費エネルギーを測定したところ、その所要時間は 24 ms で消費エネルギーは $424\ \mu\text{J}$ であった³⁾。したがって、今回のレクテナ実験を行った地点 2、7 のように平均して $400\ \mu\text{W}$ 以上の電力が得られる環境であれば 1 秒に 1 回程度温度計測と無線による結果送信が可能である。また 1、4 のように約 $200\ \mu\text{W}$ 程度の電力が得られる地点であれば、充電の

ためにデューティサイクルが延長され約 2 秒に 1 回のセンシングが可能であると見込むことができる^{*1)}。

6. おわりに

本論文では、環境中に存在する放送通信電波から得た数百 μW の電力をセンサネットワークノード駆動のためのエネルギー源として利用することを提案し、この実現のためのセンサノードの構成をのべ、実際の生活環境中の放送通信機器が発する電磁波の電界強度を測定し、これから再生可能な電気エネルギーの見積りを示した。さらに、レクテナを試作し、東京タワー周辺の良好な電波環境の下では TV 放送用の電波から電子回路の駆動に十分なエネルギーを得られることを示した。

今回調査の対象とした電波は、センサネットワークを実現するために設置されたものではない。したがって、たとえば放送通信の電波を電力源とするシステムを実環境に展開した後、周波数割当てが変更されればその後の稼働は難しくなる。周波数割当ては、公的な機関により管理されているためにそう頻繁に発生するものではないが、これに対応するには、利用する周波数を変更しレクテナを再設計するか、Powercast で用いられているように、別の電力源から電力を得て至近距離で能動的に電波を放射する必要がある^{*2)}。

さらに、今回の実験結果からは、東京タワー周辺以外の放送通信電波塔から離れた地域においては、単体のレクテナではこれより少ないエネルギーしか期待できないともいえる。この問題に対処するためには、レクテナの効率を向上させるか、数を増やすという解決策が考えられる。原理的にはレクテナの数を 2 倍、3 倍にすれば得られる電力（電流）も 2 倍、3 倍とすることができる。

こうした特性を活かせるアプリケーションとしては、たとえば、建築物の壁や床、屋根、さらには大規模な構造物といった大面積を活かせるような設置場所での環境モニタリングアプリケーションが考えられる。

謝辞 本研究は、平成 21 年度 NEDO 産業技術研究助成事業の一環として実施された。

*1 あまりにも獲得電力が少ない場合は、蓄電素子の自己放電や漏れ電流の影響が大きくなると考えられるので、別途解析を要する。

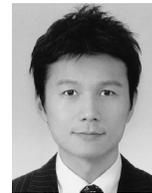
*2 2.2 節において示したように、電波を放射する場合、他のシステムに影響を与えないように、法規を遵守しながら電波強度と周波数を慎重に選択する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 財団法人機械振興協会経済研究所：ユビキタスネット向エネルギー変換デバイスにおけるわが国技術の有望性 (2008).
- 2) Paradiso, J. and Starner, T.: Energy scavenging for mobile and wireless electronics, *Pervasive Computing*, Vol.4, No.1, pp.18–27 (2005).
- 3) 澤上佳希, 西本 寛, Lakafosis, V., 川原圭博, 浅見 徹：ワイヤレスセンサーネットワークのためのエネルギー分散手法の検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, Vol.B-20-17, p.397 (2009).
- 4) 森戸 貴, 猿渡俊介, 南 正輝, 森川博之：バッテリーレス無線センサネットワークにおけるデータ収集プロトコルの設計と評価, 電子情報通信学会技術研究報告情報ネットワーク研究会, IN2008-157 (2008).
- 5) Kymisis, J., Kendall, C., Paradiso, J. and Gershenfeld, N.: Parasitic Power Harvesting in Shoes, *Proc. 2nd IEEE International Conference on Wearable Computing, (ISWC)*, pp.132–139, IEEE Computer Society Press (1998).
- 6) 株式会社音力発電：発電床™ (2009). <http://www.soundpower.co.jp/>
- 7) 日本電気株式会社：蛍光灯から電磁誘導で電力を取得する給電技術を開発 (2006). プレスリリース 2006/2/9.
- 8) Patel, S.N., Stuntebeck, E.P. and Robertson, T.: PL-Tags: Detecting Batteryless Tags through the Power Lines in a Building, *7th International Conference (Pervasive 2009)*, pp.256–273, Springer (2009).
- 9) 篠原真毅, 松本 紘, 三谷友彦, 芝田裕紀, 安達龍彦, 岡田 寛, 富田和弘, 篠田健司：無線電力空間の基礎研究, 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2003, Vol.18, pp.47–53 (2004).
- 10) 澤田和明, 高尾英邦, 石田 誠：LSI 技術とセンサ技術の融合によるインテリジェントスマートマイクロチップ (Invited Talk), 電子情報通信学会技術研究報告, MW2008-46, Vol.108, pp.81–84 (2008).
- 11) Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J.D., Fisher, P. and Soljacic, M.: Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science*, Vol.317, No.5834, pp.83–86 (2007).
- 12) Powercast (2009). <http://www.powercastco.com/>
- 13) Sample, A.P., Yeager, D.J., Powledge, P.S. and Smith, J.R.: Design of a Passively-Powered, Programmable Sensing Platform for UHF RFID Systems, *IEEE International Conference on RFID 2007*, pp.149–156 (2007).
- 14) 虫明康人：アンテナ・電波伝搬, コロナ社 (1961).
- 15) 電気通信技術審議会答申：諮問第 89 号「電波利用における人体防護の在り方」(1997). <http://www.tele.soumu.go.jp/j/ele/body/protect>
- 16) 篠原真毅, 松本 紘, 山本敦士, 桶川弘勝, 水野友宏, 植松弘行, 池松 寛：mW 級高効率レクテナの開発, 第 7 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム, SPS2004, Vol.8, pp.15–20 (2005).
- 17) セイコーインスツル株式会社：超低電圧動作昇圧型 DC-DC コンバータ起動用チャージポンプ S-882Z. <http://www.sii-ic.com/>
- 18) narda: Selective radiation meter SRM-3000. <http://www.narda-sts.de/>
- 19) 総務省：我が国の電波の使用状況 (2009). <http://www.tele.soumu.go.jp/j/freq/>
- 20) 総務省：無線局統計情報 (2009). <http://www.tele.soumu.go.jp/j/musen/toukei/>
- 21) 西山博仁, 徳永雄一, 武田保考：センサノードの低消費電力方式, 三菱電機技報, 9, Vol.80, p.14 (2006).

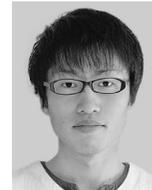
(平成 21 年 5 月 26 日受付)

(平成 21 年 12 月 17 日採録)



川原 圭博 (正会員)

昭和 52 年生。平成 17 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。同年東京大学助手。平成 19 年より助教。P2P ネットワークおよびセンサネットワークに関するプロトコル, アプリケーションの研究開発に従事。博士 (情報理工学)。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



塚田 恵佑

昭和 60 年生。平成 21 年東京大学工学部電子情報工学科卒業。エネルギーハーベストの研究開発に従事。同年東京電力入社。電子情報通信学会会員。



浅見 徹 (正会員)

昭和 27 年生。昭和 51 年京都大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年国際電信電話株式会社 (KDDI) に入社。UNIX 通信, ネットワーク障害診断, xDSL の実証実験等に従事。博士 (情報理工学)。平成 13 年 KDDI 研究所代表取締役所長。平成 18 年東京大学大学院情報理工学系研究科教授。平成 9 年度前島賞。電子情報通信学会フェロー。IEEE 会員。