

紙に印刷する無線センサノード

川原 圭博^{†1} 西本 寛^{†1} Rushi Vyas ^{†2}
Manos M. Tentzeris ^{†2} 浅見 徹^{†1}

本稿では、インクジェット印刷技術を用いて市販のインクジェット写真用紙の上に無線センサノード用のレクテナを実装するための技術について報告する。今回実装した無線センサノードは、テレビ塔から発せられた環境中を伝搬する放送電波を電力源とし、この微弱な電力をコンデンサに蓄積することで、自立的に環境中の温度などのセンサ情報を計測することが可能である。評価の結果、東京タワーから 6.5km 離れた場所において、40 秒に 1 回のデューティ比で動作を確認することができた。

A Wireless Sensor Node Printed on Paper

YOSHIHIRO KAWAHARA HIROSHI NISHIMOTO,^{†1}
RUSHI VYAS,^{†2} MANOS M. TENTZERIS^{†2}
and TOHRU ASAMI^{†1}

In this paper, we present an implementation of a wireless sensor node fabricated on commercial photo paper using inkjet-printing technology. The wireless sensor node is capable of receiving ambient RF signal power from broadcasting TV towers and converting the signal into electrical power. The power is then used to wake-up the microcontroller to sense ambient environmental information, such as temperature. The evaluation results show that the sensor sheet can operate at a distance of 6.5 km far from the Tokyo Tower in Japan within 40-second intervals.

^{†1} 東京大学

The University of Tokyo

^{†2} ジョージア工科大学

Georgia Institute of Technology

1. はじめに

低コストでメンテナンスフリーの無線センサネットワークを実現し、実世界情報をリアルタイムにモニタリングするためには、コスト削減が必要不可欠である。ここでいうコストとしては、製作コストとメンテナンスコストという二つの点を論ずる必要がある。センサネットワークは、大量のノードを空間中にばらまいて、面を対象をセンシングすることが特徴であるため、まずは一つ一つのノードが安価に構成できなければ普及は難しい。一方で、ノードを大量に配置した後に定期的なバッテリー交換や部品交換が必要なようではこれも実用化の大きな障害になる。これらのコストの増加に対して一挙に一定の解を与えるための方法として、我々は環境からのエネルギーを回収する電子回路をプリントドエレクトロニクス技術を用いて構成する手法について取り組んでいる。

現在、電子回路は、フォトリソグラフィ法により製造するのが一般的である。この方法は、半導体ウェハー上に素子・回路のパターンを焼き付け、不要な部分をエッチングにより除去するというプロセスの繰り返しを行うものである。したがって、材料効率が低く環境への負荷が高いという欠点がある。そこで「必要な材料」を「必要な場所」に「必要な量」だけ塗ることができる、印刷技術を用いた電子回路の設計法が着目されている。この“プリントドエレクトロニクス”は、大面積に作製しても低コストであること、分子性ナノ材料を用いた素子の実装ができること、インクジェットのようなデジタルファブ리케이션を使った新しい製造手法であること、という大きな特徴を有している。このプリントドエレクトロニクス技術により、紙の上に電子回路を構成できれば、そのインパクトは大きい。紙は人類にとってこれまで最もなじみの深い物質の一つであるだけに、極めて安価に製造可能な有機物質の一つである。印刷技術という意味では 500 年以上もの技術の蓄積があり、大量かつ高速な印刷が可能である。また、紙はそのままでは水に弱い適切な処理を施すことにより耐水性を持たせることが可能である。インクジェット写真用紙で用いられているような表面コーティングを施すことにより、導電性インクペーストを用いてアンテナや導線を描き、IC やメモリ、バッテリー、センサを紙の表面に実装することも可能である。

一方、展開後のメンテナンスを不要にするために必要なのが、給電の問題である。既存のほぼすべての無線センサネットワークのための MAC プロトコルやルーティングプロトコルは、与えられた電力量を考慮した設計になっているものの、現実には定期的にバッテリーを交換すること自体が大きな運用コストである。この問題に対しては、環境中に存在する各種エネルギーを電力に変換してノードの動作に用いるエナジーハーベスティングが有効

であると考えられる。環境モニタリングを行うようなアプリケーションであれば、太陽電池を用いて太陽光からエネルギーを得る方法が考えられるが、夜間はエネルギーが得られないほか時刻、季節によるエネルギー変動も大きいことが問題となる。また、振動、温度差による発電は場所を選ぶという問題がある。本稿では、印刷技術と相性が良い方法としてレクテナを用いた電波からの給電技術に着目する。レクテナ (Rectenna) とはその名の通り整流器 (Rectifier) とアンテナ (Antenna) を組み合わせた回路であり、アンテナにより受信した電波を直流電流に変換することができる。日常生活中において、電波を活用したシステムは増加傾向にある。これらは主に放送や通信のために敷設されたものであるが、より広いエリアをくまなくカバーするために設計されているという性質を持つ。これを裏返せば、こうした環境中に漂う電波から電力を回収することができれば、いつでもどこでも利用できる電力源としての利用が可能になることを意味している。

本論文では、こうした取り組みに向けたフィージビリティスタディとして、市販のインクジェット写真用紙上に実装した無線センサノードの設計と実装について報告する。このノードは銀ナノインクにより印刷して形成したダイポールアンテナを通じて東京タワーからの放送波を受信し、5段コッククロフトウォルトン回路で整流、昇圧した電荷をコンデンサに蓄積することで半永久的に動作を繰り返すことができる。東京タワーから6.5km離れた地点での評価の結果、実装したアンテナを用いて温度情報を約40秒に一度センシングし、2.4GHzの無線を使ってデータを送信することが可能であることを示すことができた。

2. 電波からのエネルギーハーベスト

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。この時の関係式は次のように表すことができる¹⁾。

$$V_0 - ZI = Z_l I \quad (1)$$

したがって負荷に流れる電流は

$$I = \frac{V_0}{Z + Z_l} \quad (2)$$

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1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、

$$W_a = R \left| \frac{V_0}{2R} \right|^2 = \frac{|V_0|^2}{4R} \quad (3)$$

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 \mathbf{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。

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

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²⁾」で許容電界強度が定められており、10k-3MHz (AMラジオ放送等) は27.5 V/m、30-300 MHz (FMやTV放送等) が27.5 V/m、1.5-300 GHz (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。ただし、受信アンテナの実効サイズは、1MHzと1GHz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言えない。また、携帯電話や無線LANの周波数帯では通信方式の性質上、デューティサイクルの変動が大きい。東京都内での調査の結果では、テレビ放送の周波数帯がもっともエネルギー源として利用しやすいという結論を得た³⁾。テレビ放送の電波塔はなるべく広いエリアをカバーするよう、高いところに設置されている。この性質は、給電を考えると非常に都合のよい性質であるといえる。

3. アンテナの設計と実装

今回の実装には520MHzを中心周波数とする半波長ダイポールアンテナを選んだ。アンテナはその形状により、得られる指向性と利得が大きく変化する。放送電波から電力を得るエネルギーベスティングでは、設置場所や向きなどに依存しないようにできる必要がある。ダイポールアンテナはチューニングが容易であり、また、無指向性アンテナであるため、あらゆる方向からの放送電波を受信しやすい。また、帯域も広いため、TV放送を受信するアンテナに向いているといえる。しかしながら、無指向性である分、利得を高くできないことが欠点として存在する。放送塔が1つと仮定でき、特定方向に指向性を持つことによって獲得電力を増やすことも可能である。ダイポールアンテナの理論的な最大利得は2.14dBi、

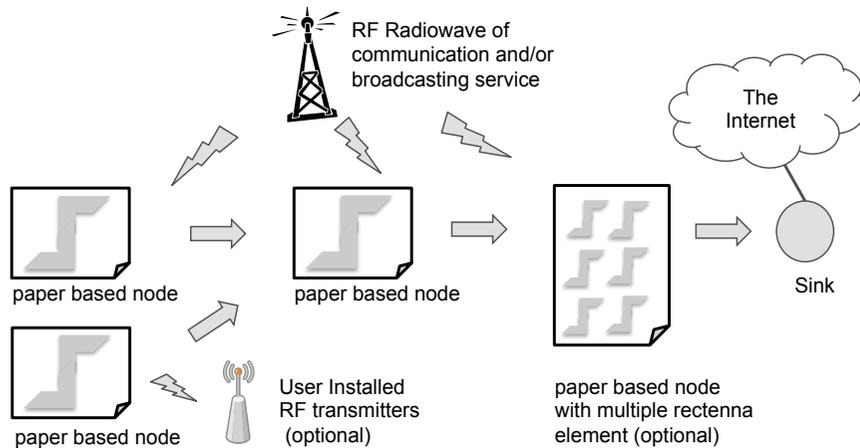


図1 電波から給電するセンサネットワークのアーキテクチャ

Fig. 1 The architecture of the RF energy scavenging wireless sensing system.

また最大で帯域の30%程度を受信できる。パッチアンテナは8dBi程度という高い利得を持つことが可能で、寸法も小型にすることが容易であるが、帯域は中心周波数の2~5%にとどまる。東京タワーから放射された放送電波のうち、地上アナログTV放送は476MHz~482MHz, 488MHz~494MHz, 地上デジタル放送の512MHz~566MHzを用いてサービスされている。ダイポールアンテナは地上デジタル放送の周波数のすべてに加え、地上アナログの放送すべてを受信可能な周波数におさめることが可能である。一方、最大でも中心周波数の5%しか受信できないパッチアンテナは地上デジタル放送の半分の周波数のみ受信できることになる。東京タワーでの送信電力から、地上アナログ放送のUHF電波と、地上デジタル放送のUHF電波から受信できる電力はほぼ等しいと考えられるので、6dB(電力で4倍)利得の良いパッチアンテナでも、受信可能な電力は、ダイポールアンテナの半分と見積もることができる。

VHF帯に比べて周波数が高く波長が短いUHF帯の放送電波から電力を再生するアンテナの望ましい設計を考える。UHF帯の周波数を選択する利点は、VHF帯に比べて波長が短いため、寸法が小さくて済むことにある。現在、世界中で最も多く利用されているプリンタはA4用紙やレターサイズの内紙を印刷できるように作られている。A4用紙の寸法は210mm×297mmであり、レター用紙の寸法は、8.5in×11in(ミリ換算で215.9mm×279.4mm)であ

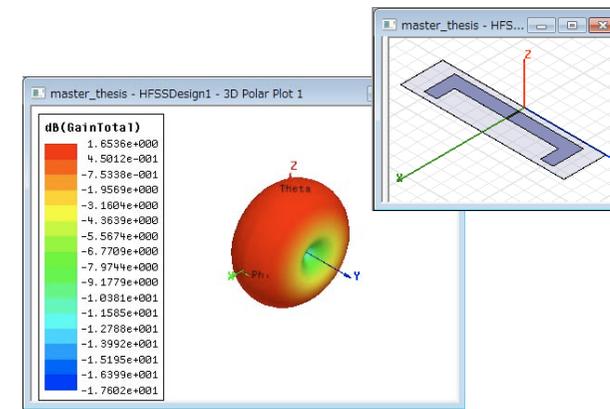


図2 ダイポールアンテナのシミュレーションによる設計
Fig. 2 Design of a dipole antenna using the simulator

る。一方、波長は、周波数470MHz~770MHzを使って式5から、約389.61mm~638.30mmである。470MHz~770MHzの波長の半分の計算すると、約194.81mm~319.15mmであるので、用紙を横に使うことにより、半波長ダイポールをA4・レターサイズの上に実装することが可能である。

$$c = f\lambda \quad (c: \text{光の速さ}, f: \text{周波数}, \lambda: \text{波長}) \quad (5)$$

東京を中心とする関東地方では主に東京タワーからTV放送電波が発信されている。東京タワーから発信されているTV放送電波は、地上アナログTV放送の476MHz~482MHz, 488MHz~494MHz, 地上デジタル放送の512MHz~566MHzである。したがって、476MHz~566MHzまでの90MHzを帯域に持つアンテナを設計すれば、東京タワーから放射されているUHF帯の電波を受信できる。

520MHzを中心周波数とする、紙を基板とする半波長ダイポールアンテナを設計した(図2)。520MHzの波長の1/4半波長は約144mmである。左右の長さ144mmとすると、レターサイズの長辺である279.4mmに収まらなくなる。したがって、アンテナを直角に折り曲げることで、多少の利得と引き換えに紙に収まるようにしている。またアンテナの幅を21mmに増し、多少の効率低下と引き換えに帯域を増加している。直接印刷してアンテナを作成する前にAnsoft社のHFSSを用い、高周波シミュレーションを行なった。

実際の印刷にはDimatix社のDimatix Materials Printer (DMP-2800)をインクジェツ

トプリンタとして用い、銀インクには CABOT 社の Cabot Conductive Ink 300 (CCI-300) を用いた。カートリッジには 1pL のインクを出すノズルが 16 個あり、それぞれに別々の電圧を設定することが可能である。現在では、安価な銅等の粒子を含むインクはまだ研究途中であるため、高価ではあるが扱いやすい銀粒子を含むインクが利用されている。銀インクはカートリッジのノズルから紙の上に粉霧されたあと、焼結により余分な溶媒や不純物を取り除く。また、焼結によって紙と銀粒子の結びつきがよくなるという作用もある副次的な効果も期待できる。焼結時間と温度によって、インクの導電率は $0.4 \sim 2.5 \times 10^7 \text{ S/m}$ (ジーメンズ/メートル) まで変化する。高い温度で長時間焼結したときのほうがより高い導電性を示すが、紙の上に銀インクを塗布する場合には、温度によって、反りが発生したり、焼き色がついてしまうことがあるため、注意が必要である。印刷するパターンにも依存するが、 $10 \mu\text{m}$ の厚みを得るために約 6~10 時間かけて 10 回の重ね塗りをを行い、 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ で 8 時間の焼結を実施する必要がある。

実装したアンテナの特性評価の結果を図 3 に示す。評価にはネットワークアナライザを使い、反射特性である S_{11} を測った。比較のため、シミュレーションのダイポールアンテナ (Simulator)、実際の銀インクを使った紙アンテナ (paper)、市販の UHF アンテナ (YAGI) の 3 種類の S_{11} をプロットした。測定結果から、シミュレーションに比べ、20MHz ほど中心周波数が低周波数側にシフトしたものの、紙アンテナの周波数帯域は 480MHz~600MHz までであり、十分な帯域を持っていることを確認した。

4. 整流回路の設計と実装

マイコンやセンサ等を駆動するためには、高周波の信号である電波から直流へ変換する、整流を行なう必要がある。整流は、低周波ではトランスやダイオード、高周波では高周波用ダイオードを使って行なわれる。また、放射された電波をフラウンホーファ領域で受信する際、信号は減衰するため、複数のダイオードを使って昇圧を行なう必要がある。

放送電波から電力再生を行ない、センサノードを動作させる際には、ノードが動作状態である時間よりも、スリープ状態である時間の方が圧倒的に長い。例えば、1:1500 のデューティ比の場合、動作時の 1500 倍の時間は充電に当てられる。したがって、充電中の回路インピーダンスとアンテナのインピーダンスをマッチングする必要がある。5 段の昇圧回路と SMA 端子との間にマッチング回路を挿入することによって、このマッチングを実現する。

今回、東京タワーから約 6km 離れた場所でもマイコンの動作可能電圧である 3.6V 程度まで昇圧するように 5 段の昇圧回路を設計した。ダイオードには、高周波用のショットキバ

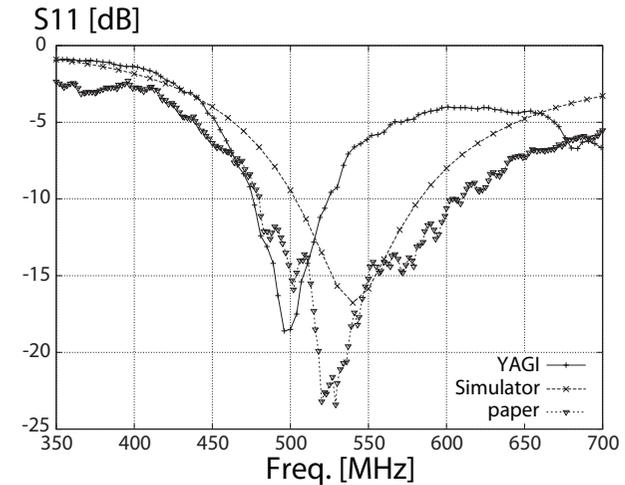


図 3 ダイポールアンテナの実装結果
 Fig.3 Implementation of a dipole antenna.

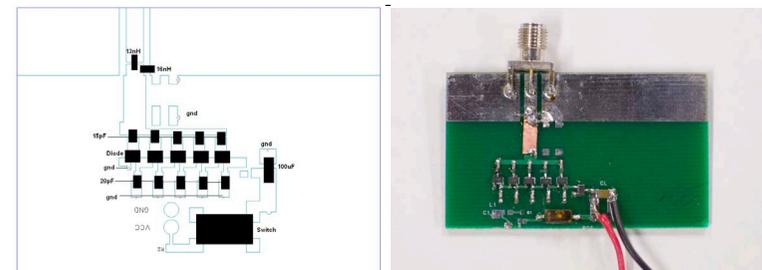


図 4 5 段の整流昇圧回路の回路図と写真
 Fig.4 Circuit and picture of 5-stage rectifier.

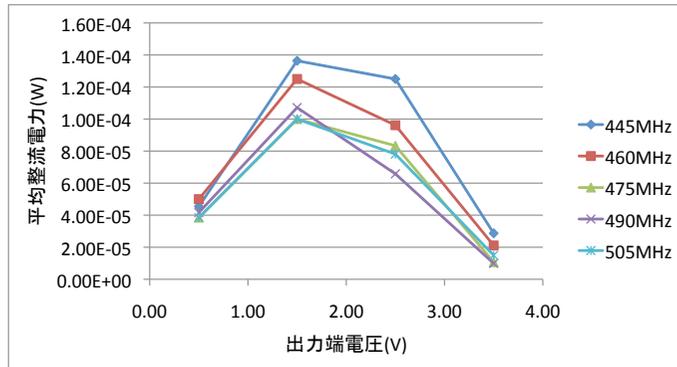


図 5 出力電圧に対する平均整流電力

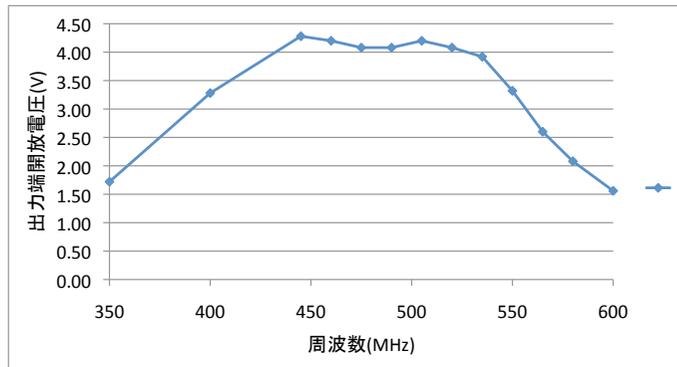


図 6 出力開放電圧の周波数依存性

リアダイオードを 2 回路直列で内蔵している HSMS-282C を使い、キャパシタ容量は 15pF と 20pF を使った (図 4)。これはいずれも、0.6~0.7V 入力を想定して実行した回路シミュレーション結果から算出された値である。アンテナとの接続の端子として SMA 端子を付けたため、SMA 端子の外から見たインピーダンスの虚数成分が 520MHz 付近で限りなく 0 に近づくように計算し実装した。

電圧 V_1 から V_2 までの充電に要する時間を t とすると、 $U = 1/2CV^2$ から、充電中の平均電力は下記の式 6 で求められる。この式を使い、それぞれの入力周波数で、0V~1V、

1V~2V、2V~3V、3V~4V の充電が終るまでに要した時間と、それぞれで得たエネルギーを計算し、充電中の平均電力を求めた (図 5)。

$$P = \left(\frac{1}{2}CV_2^2 - \frac{1}{2}CV_1^2 \right) / t \quad (6)$$

この結果から、充電効率は出力電圧によって変化することがわかる。0V~1V と 1V~2V での平均電力を比較すると、大きいところでは 2.5 倍以上の差が生じている。また、出力端電圧が開放電圧に近づくにつれ、平均電流は下がり、充電効率が低下している。例えば、445MHz、2V~3V の平均電力は 125 μ W であり、入力電力の 500 μ W で割ると、整流昇圧の効率は、125/500 \times 100 = 25% である。一方、3V~4V での平均電力は 21.1 μ W であり、整流昇圧効率は 21.1/500 \times 100 = 4.22% であり、この差は 5 倍以上である。100 μ F のキャパシタを使っているため、充電時間はわずか数秒~数十秒であり、非常に短い時間である。しかし、実際に電力を消費している時間はほんの数ミリ秒であるので、1000 倍もの時間を充電に充てることになる。したがって、消費時よりも、充電時のほうがセンシング頻度に大きな影響を与える。今回マイコンとして利用する MSP430 の動作可能電圧範囲は 1.8V~3.6V である。先の結果は、3V~4V 付近の高い電圧で充放電を繰り返す場合に対して、2V~3V の低い電圧で充放電を繰り返した方が 5 倍以上にセンシング頻度を増やすことができることを意味している。したがって、マイコンに電力を供給することを前提として考えるエネルギーハーベスタとしては、マイコン供給電圧での整流効率を比較するべきであり、充電中の平均電流で性能を比較するべきである。

続いて、東京タワーから配信されている、地上アナログ TV 放送の 476MHz~482MHz、488MHz~494MHz、地上デジタル放送の 512MHz~566MHz の周波数範囲における整流効率を測定した。出力開放電圧が、ノードの最低動作電圧を満たす範囲において -3dBm (500 μ W) の入力で 90 秒間充電した場合の出力開放電圧をそれぞれの周波数で測定しプロットした (図 6)。この結果から、多少のばらつきはあるものの、450MHz~550MHz までを中心として整流ができていくことがわかる。440MHz~535MHz の範囲の入力周波数のときに 4V 以上の出力電圧を得ることができ、また、390MHz~550MHz の範囲の入力周波数では 3V の出力電圧を得られた。これは、東京タワーから発信されている地上アナログ放送の 476~494MHz、地上デジタル放送は 512MHz~566MHz のうちの大半をカバーできていることを示す。

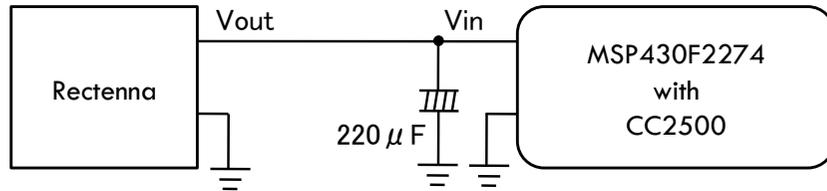


図7 センサノードの接続図
Fig. 7 A block diagram of the sensor node.

5. 無線センサノードの実装と評価

紙に印刷したアンテナとガラスエポキシ基板に実装した整流昇圧回路を使用して評価を行った。これにより、銀インクを利用したインクジェット印刷によって作成した紙アンテナで電波を受信する無線センサノードの有効性を検証した。

測定実験は東京大学本郷キャンパス2号館の11Fの南を面した部屋のベランダで行った。ガラスエポキシ基板の整流回路と、紙アンテナでレクテナを構成し、その出力をマイコンへ供給した。マイコンの入力電圧をオシロスコープで観測し、パケット送信時のノードの動作を確認した(図9)。マイコンでは、温度センサから温度情報を読み取り、この情報をSimplicityプロトコルを用いて隣接する基地局に対して送信し、スリープモードに入るという処理を繰り返している。測定の結果、40秒に1回の送信頻度であれば、エネルギーが底をつくことなくタスクを実行可能であることを確認した。その際のマイコンの入力電圧の変化の様子を図9に示す。タスク実行後2.2Vまで低下した電圧が3.2Vまで上昇していることがわかる。

6. 関連研究

本研究は、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目的として実施した。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。

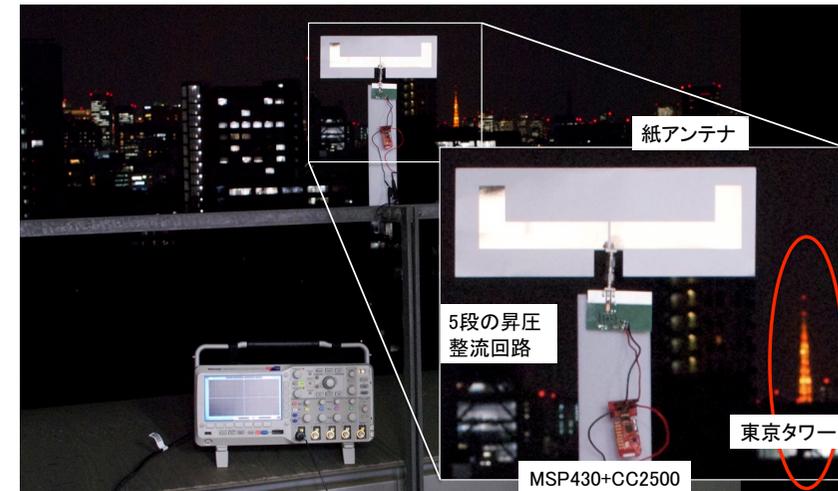


図8 ベランダでの測定実験の様子。中央部に東京タワーが確認できる。
Fig. 8 Experiment at balcony. Tokyo tower is seen at the center corner.

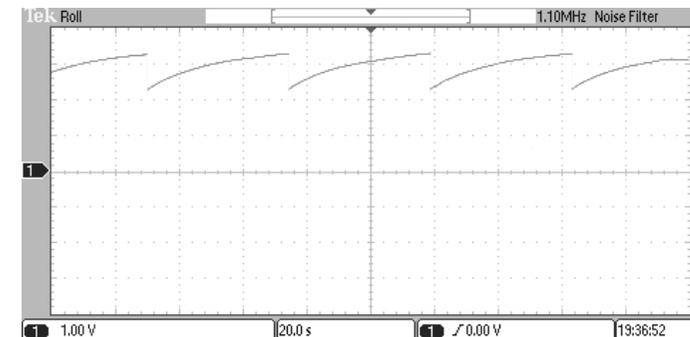


図9 整流回路出力電圧の変化する様子

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⁴⁾。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⁵⁾。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⁶⁾、澤田⁷⁾、Kurs⁸⁾ 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 Powerharvester⁹⁾ は、宅内に電力送信機を配置し、宅内のリモコン等に数百 μ W 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¹⁰⁾。これらは遠方電界を利用して、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伴う。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言える。

7. おわりに

本稿では、インクジェット印刷技術を用いて無線センサノードを構成するための第一歩として給電用のアンテナを実装したことを報告した。銀ナノインクを用いて市販のインクジェット写真用紙上にダイポールアンテナを実装し、5段コッククロフトウォルトン回路に接続することで温度センサと無線トランシーバを搭載したマイコンを 40 秒に一度駆動するのに十分なエネルギーを、テレビ放送用の周波数帯から得ることができた。現在、昇圧回路についても紙への印刷による実装を完了し評価を進めている。

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

参 考 文 献

- 1) 虫明康人：アンテナ・電波伝搬，コロナ社 (1961)。
- 2) 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>.
- 3) 川原圭博, 塚田恵佑, 浅見徹: 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, 情処論, Vol.51 No.3 pp.824-834, (2010)
- 4) 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.
- 5) 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)*, Springer, pp.256-273 (2009).
- 6) 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).
- 7) 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).
- 8) 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).
- 9) Powercast: <http://www.powercastco.com/> (2009).
- 10) 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).