

電磁波エネルギー回収技術の研究開発

Research and Development of Radio Wave Energy Harvesting

代表研究責任者 小林 聖 株式会社国際電気通信基礎技術研究所

研究開発期間 平成 24 年度～平成 25 年度

【Abstract】

We have conducted research and development of radio wave energy harvesting from ambient radio waves to be used for emergency power and battery-less systems. The goal of this project is to obtain 1.5V, 100 μ W DC output with 1m² harvesting panel under defined environment condition.

To achieve this, we have developed a triple band harvesting panel with 1m² size that comprises highly-efficient antennas, RF-DC conversion circuits, and DC/DC circuits. The developed panel has achieved more than 120 μ W of power generation at 1.5 V under a defined environment reproduced in an anechoic chamber. It was also confirmed that a ZigBee based wireless sensor device can be operated with the harvested energy. In addition, we have succeeded in continuous operation of low power consumption LCD thermometer with the harvested energy in the real environment.

1 研究開発体制

- 代表研究責任者 小林 聖 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所)
- 研究分担者 小林 聖 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所)
野瀬 浩一 (ルネサスエレクトロニクス株式会社)
久々津 直哉 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所)
- 研究開発期間 平成 24 年度～平成 25 年度
- 研究開発予算 総額 397 百万円
(内訳)

平成 24 年度	平成 25 年度
198 百万円	199 百万円

2 研究開発課題の目的および意義

東日本大震災では、停電が長時間・広範囲に及んだため、自家用発電機の燃料やバッテリーの枯渇により電力供給が困難となり、被災者に大きな不安と不便を与えた。非常時における電源の多様化、冗長性確保は急務であり、このような問題を解決するため、本研究開発では、生活空間に存在し、昼夜・天候を問わず回収が可能な電磁波エネルギーを捕捉・回収し、電気エネルギーとして再利用することで、非常時にも活用可能な電源確保を実現するための技術の確立を目的とした。この目的を実現するために、本研究開

発では、技術目標として、複数の周波数帯域に対応し高効率の電力回収を可能とする技術の開発を行うこととした。

具体的には、入力信号レベル-20dBm 以下の環境下において、1.5V 程度の電圧で、単層アンテナ 1m² 当たり 100μW 以上の電力が継続的に出力可能なシステムを構築するためのアンテナ技術、回路技術およびそれらのシステム化技術の研究開発を実施し、さらに、実証実験により性能を検証し、実利用の可能性を示すこととした。

3 研究開発成果

入力信号レベル-20dBm の環境下において、1.5V 程度の電圧で、単層アンテナ 1m² 当たり 100μW 以上の電力が継続的に出力可能となるようシステム設計を行い、実証実験を通じて性能評価を行う。

全国 20 か所余りの実測値に基づき、V-High マルチメディア放送 (207.5-222MHz : 以下 V-High)、地上デジタルテレビ放送 (470-566MHz : 以下 DTV)、800MHz 帯携帯電話 (860-890MHz : 以下 800M) の周波数帯域を回収対象と定め、高効率の電磁波エネルギー回収技術の構築とシステム試作、実証実験を行った。

アンテナは同一面内に入射する 3 周波数を高効率に受信する技術を確立し、3 周波数の平均で 63% のアンテナ開口効率を実現した。受信した RF 信号を DC 電力に変換する RF-DC 変換回路については、製造バラツキを考慮しつつ-20dBm の RF 信号入力において各周波数とも 30% 以上、最大 46% の電力変換効率を達成した。複数の RF-DC 変換回路からの DC 電力を集約し、1.5V に昇圧する DC/DC 回路については 100μW 出力時の電力変換効率 78% を達成し、無負荷時の消費電力を 2.8μA と極めて小さく抑えることができた。また RF-DC 変換回路と DC/DC 回路のトータルの電力変換効率は 27% を達成した。

以上のアンテナ、RF-DC 変換回路、DC/DC 回路を統合して、電磁波エネルギー回収パネル (RPH パネル) を試作し、実証実験を行った。以下、実証実験の結果について述べ、3.1~3.3 節において個別技術の研究開発成果を詳細に述べる。

RPH パネル評価環境について

基本計画書では、RPH パネルを評価するための環境は上記のように「入力信号レベル-20dBm の環境下」となっている。しかしながら、この環境下では、アンテナの性能如何に関わらず-20dBm を受信した状況での評価となり、RF-DC 変換回路および DC/DC 回路は評価できるが、アンテナを含んだ RPH パネル全体の評価ができない。

また、各周波数で一律に-20dBm とし、アンテナ利得も変わらないとすると、高い周波数で非常に高い電力束密度環境となり非現実的である。受信電力 P と電力束密度 p、アンテナ利得 G、波長 λ の関係は、

$$P = p \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

であるので、アンテナの性能が標準ダイポールアンテナ相当の性能 (利得 2.1dBi) を仮定すると、V-High (215MHz) では 40μW/m² であるが、800M (875MHz) では 660μW/m² と極めて高い電力束密度の評価環境となってしまう。

以上のように当初の評価環境には二つの問題があるため、アンテナを配置する空間での電力束密度を評価環境の指標とすること、そして、周波数によらず一律の電力束密度を用いることを念頭に、運営委員会

での議論を経て、次のように評価環境を追加設定した。つまり、「基準周波数にてダイポールアンテナで受信した時のアンテナ出力端電力が-20dBm となるような電力束密度の環境」とした。ここで、基準周波数（波長）は、回収対象として定めた 3 周波数の中間にあたる DTV 帯域の中央の周波数 518MHz とした。また、アンテナ効率 80%が当初のアンテナに対する目標であったため、ダイポールアンテナの効率を 80% とした。

これらにより、評価環境となる電力束密度の具体的な数値を算出すると、 $286\mu\text{W}/\text{m}^2$ となる。現実的な送信側パラメータを仮定して、この電力束密度が観測される送信所からの距離を算出すると、表 3-1 に示すように現実的な値となることから、本電力束密度をもつ評価環境は妥当と考えられる。

表 3-1 電力束密度 $286\mu\text{W}/\text{m}^2$ の観測される送信所からの距離（自由空間を仮定した計算）

周波数帯	送信条件	送信所からの距離
V-High	ERP:220kW（生駒送信所）	10 km
DTV	ERP:25kW×5ch（生駒送信所）	7.5 km
800M	ERP:300W	300 m

RPH パネルの詳細設計および実測評価

本研究開発の各課題で開発したアンテナ、RF-DC 変換回路、DC/DC 回路を組み合わせ、回収電力を最大化するシステム設計を行い、その設計に基づいた RPH パネルを試作した。また、前述の評価環境を構築するため、電波暗室内に信号発生器、送信機等を設置して PRH パネル配置場所の電力束密度を調整した。（図 3-1 参照）。

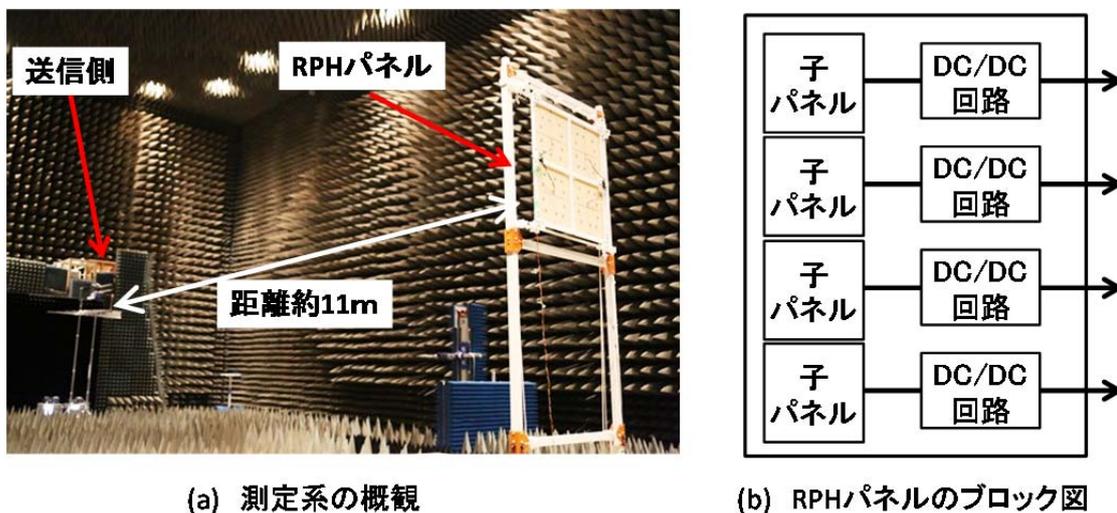


図 3-1 電波暗室の評価系

具体的には、V-High、DTV、800M の各周波数帯域での電力束密度を $286\mu\text{W}/\text{m}^2$ に設定し、RPH パネルでの回収電力を CW と変調波で評価した。その結果、表 3-2 に示すように、出力電圧が約 1.5V で $120\mu\text{W}$ の出力が継続的に得られ、到達目標である $100\mu\text{W}$ 以上の DC 電力回収が可能であることを実証した。

表 3-2 出力電力

送信信号形式	負荷抵抗 [kΩ]	出力電圧 [V]	出力電力 [μW]
CW	11	1.22	136
	18	1.47	120
変調	13	1.26	124
	20	1.46	106

RPH パネルによるセンサノード駆動実験

実際のセンサノードとの連携の実現性を検証するため、この RPH パネル評価系に ZigBee インターフェースを持ったセンサ（照度、加速度、温度）を接続し、無線センサデバイスの駆動実験を行い、動作を確認した（図 3-2 参照）。

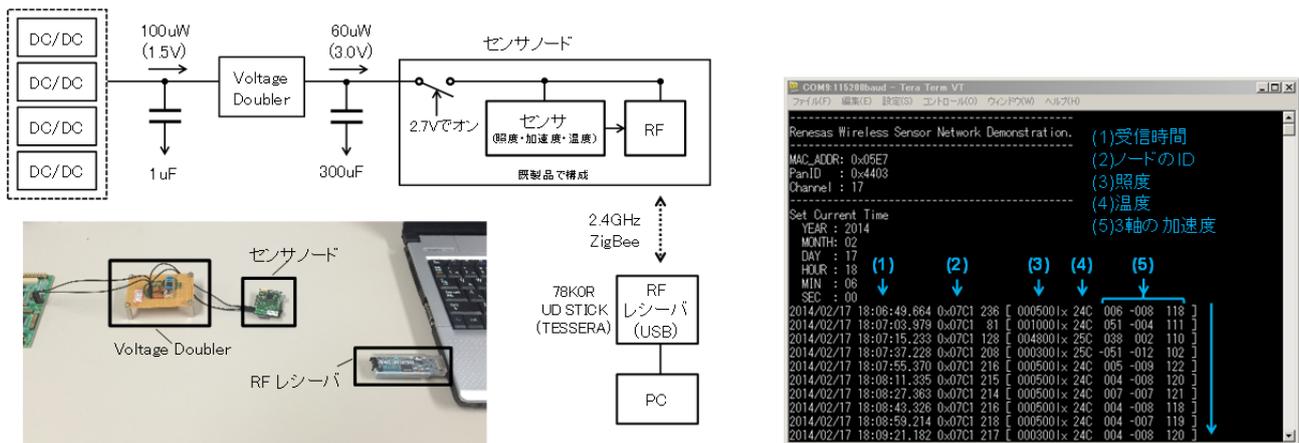


図 3-2 無線センサデバイスの動作実験

実環境における RPH パネル実測評価

実環境における電力回収実験としては、50cm 角のフレキシブル基板 2 枚を用い、株式会社 国際電気通信基礎技術研究所の社屋から約 11km 離れた生駒山から送信されている V-High、DTV の 2 周波からの電力回収実験を行った。このときダイポールアンテナでの受信電力はそれぞれ、-14dBm、-25dBm であった。この環境において電力を回収した結果、約 1.5V 出力で 12μW の電力が得られ、低消費電力の LCD 温度計を連続的に駆動させることに成功した（図 3-3 参照）。

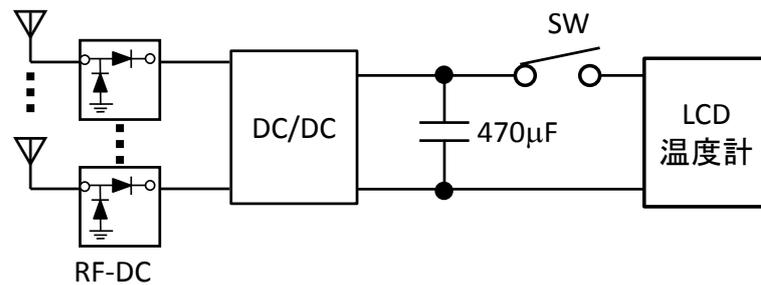
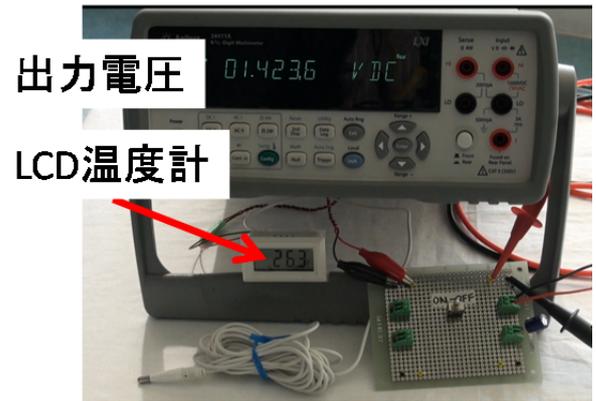
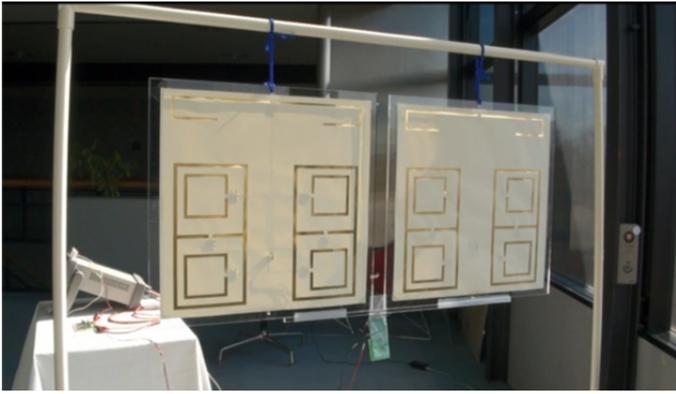


図 3-3 実環境での電力回収実験の様子

3. 1 複数帯域対応高効率アンテナ技術

本研究開発において開発する RF-DC 変換回路とも親和性が高く、放送や通信用に使用されている 3 以上の周波数帯域において、周囲の電波環境に対応し、高効率（目安として、定在波比（VSWR）2.0 以下、アンテナ効率 80%以上）が確保できる平面アンテナ技術を確立するとともに、複数のアンテナを効率よく配置するための構造・配置手法の検討を行い、多段化のための技術を確立する。

3. 1. 1 複数周波数帯の選択

まず、電磁波エネルギー回収対象の複数周波数を決定するために、東北、関東、関西地域の全 20 か所余りの地点において 76MHz~2170MHz の帯域で電力束密度の測定を行った。その結果、送信基地局の見通し状況や距離によっても大きく異なるが、V-High マルチメディア放送（207.5-222MHz）、地上デジタルテレビ放送（470-566MHz）、800MHz 帯携帯電話（860-890MHz）の平均電力束密度が大きいことが明らかとなった（図 3-4）。したがって、この 3 周波数の電波を回収対象として検討を進めることにした。

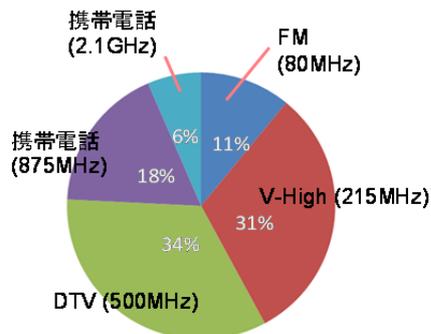


図 3-4 全測定地点の平均電力束密度の周波数別割合

3. 1. 2 複数帯域対応高効率アンテナ構造の検討

上記測定と並行して複数帯域対応高効率アンテナの基本検討を進めた。1枚のプリント基板上に複数帯域のアンテナを設けることを念頭におき、広帯域（1ポート出力）アンテナ、複数ポート出力アンテナ、複数モノバンドアンテナの3種類（図3-5）の候補を挙げ、基礎検討を実施した。VHF、UHF帯であることからいずれも線状アンテナとした。アンテナの給電部に接続するRF-DC変換回路（3.2で検討）は、1モジュールでV-Highから800Mの広帯域を高効率にカバーすることはできないため、帯域ごとに最適化されたRF-DC変換回路を用いる必要があることがわかった。これを鑑み、帯域ごとのモノバンドアンテナをもつ複数モノバンドアンテナ方式を採用することに決定した。

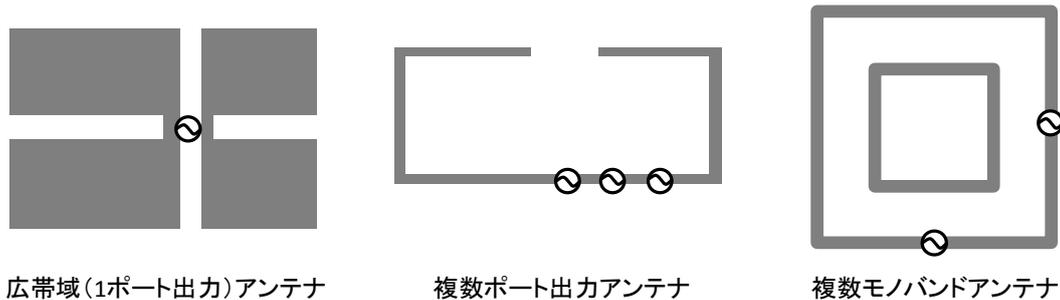


図 3-5 基礎検討を行った 3 種類のアンテナ

なお、アンテナ性能の目安である「VSWR 2.0 以下、アンテナ効率 80%以上」を、プロジェクト全体の到達目標「100 μ W の電力回収」に直接的に整合させるために、運営委員会で議論し次のように整理した。100 μ W の DC 電力を得るためには、RF-DC 変換回路の電力変換効率、DC/DC 回路の電力変換効率の目標値（3.2.1 項に記載）がそれぞれ 30%と 70%であることから、

$$\frac{100\mu W}{0.3 \times 0.7} = 476\mu W$$

の RF 電力を受信する必要がある。3 章冒頭で説明した評価環境では、電力束密度が各周波数で 286 μ W/m² である。したがって、各周波数の所要のアンテナ開口効率 η_a は、

$$286\mu W/m^2 \times 1m^2 \times 3(\text{周波数}) \times \eta_a = 476\mu W$$

の関係式から、 $\eta_a = 55.5\%$ となる。すなわち、3 周波数の平均で 55.5%のアンテナ開口効率が必要となるため、これをアンテナ性能の目安とすることにした。

アンテナ基板材料としては、様々な設置シナリオを考慮して、リジッド基板、フレキシブル基板の 2 種類を用いて設計することにした。各モノバンドアンテナ間の相互結合が開口効率に大きく影響するため、これを考慮した設計を行った。また、開口効率の最大化のみを追求しても、RF-DC 電力変換効率の非線形性により、最終的に得られる DC 電力が最大化されないため、この非線形性も考慮した。さらに、RF-DC 変換回路から出力された DC 電力を集約するための DC 配線がアンテナ性能を劣化させることも明らかとなったが、チョークインダクタを配線上に配置するなどにより対処し、性能劣化を低減した。

最終的に得られたアンテナの構成（リジッド基板）を図 3-6 に示す。図のプリント基板は 50cm 角であり、これを 2 \times 2 に配列しておよそ 1m 角となるようにした。V-High はベントダイポール（50 Ω 平衡給電）、DTV と 800M は方形ループアンテナ（100 Ω 平衡給電）であり、それぞれの給電点に RF-DC 変換回路用のサブ基板が実装されるようになっている。DC 配線上には適宜チョーク用のチップインダクタを挿入した。開口効率は表 3-3 に示すように 3 周波数の平均で 55.5%を超え目標を達成した。

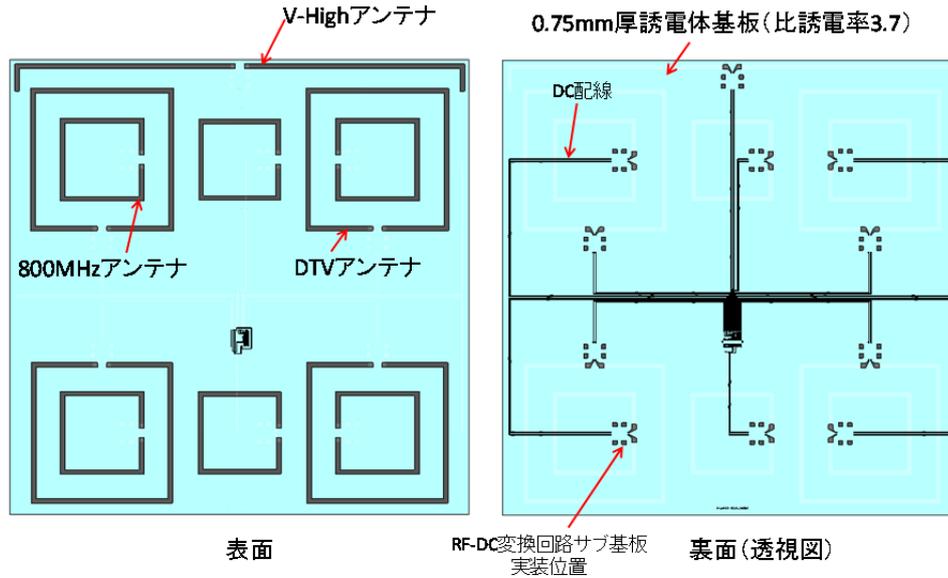


図 3-6 複数帯域対応高効率アンテナの構成

表 3-3 アンテナ開口効率 (リジッド基板)

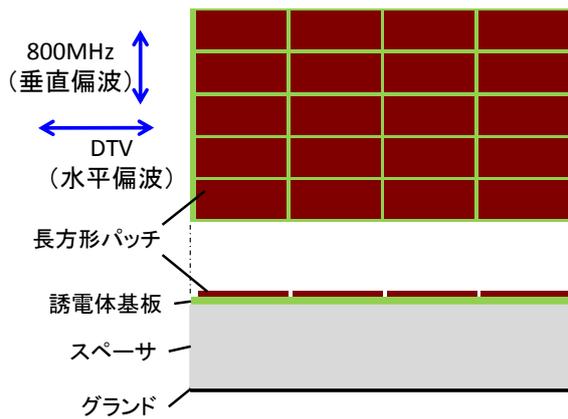
	V-High (%)	DTV (%)	800M (%)	平均 (%)
シミュレーション	85.2	51.0	39.8	58.7
測定	99	46	44	63

3. 1. 3 AMC(Artificial Magnetic Conductor) 反射板の検討

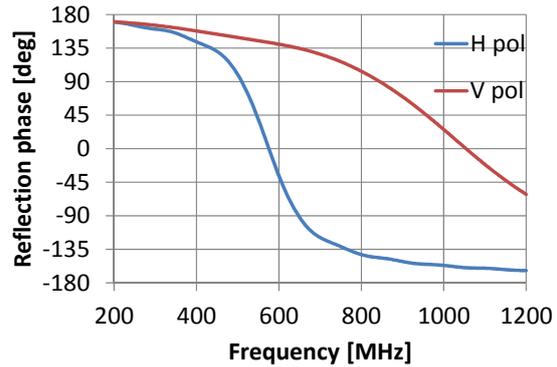
回収電力を最大化するためのインピーダンス整合などを含む周波数選択技術にも取り組んだ。その一つとして、アンテナを設置する際の壁等の影響を低減するとともに利得向上が可能な複数帯域 AMC 反射板を検討した (到達目標を超える先進的成果)。

AMC 反射板は、グランド板とその上に周期的に配置された金属片で構成され、ある特定の周波数で反射位相が 0° となることが特徴である。このため、線状アンテナをこの反射板に近接して配置することができ、なおかつ利得向上を図ることができる。本研究開発では、金属片を長方形パッチとして、反射位相が 0° となる周波数を直交する偏波で別々に調整できる偏波依存 AMC 反射板の 2 周波数アンテナへの適用を提案した。

2 周波数として、DTV (主に水平偏波)、800M (主に垂直偏波) に対応した偏波依存 AMC 反射板 (図 3-6) を設計・評価した。さらに、これら 2 周波数で最も高い効率の得られるアンテナ配置を検討し、このアンテナ基板を組み合わせ、試作によりアンテナ性能を評価した (図 3-7)。その結果、アンテナ正面方向と背面方向の利得の比が 14dB 以上となり、設置壁等の影響を低減できることを確認した。さらに正面方向利得も 6.7~8.2dBi と高効率なアンテナを実現できた。

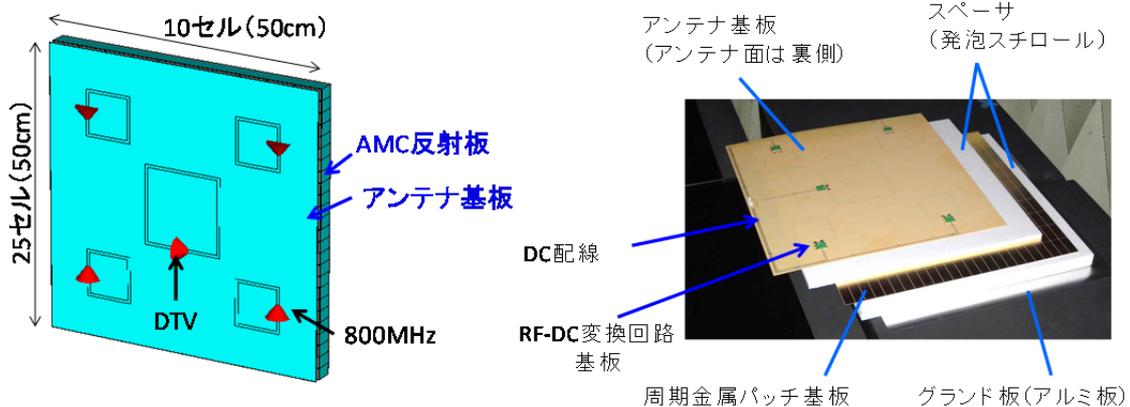


偏波依存AMC反射板の構成



偏波ごとの反射位相

図 3-6 偏波依存 AMC 反射板



偏波依存AMC反射板と2周波数アンテナ基板

DC配線等を含む試作品

図 3-7 偏波依存 AMC 反射板を用いた 2 周波数アンテナ

3. 2 高順電流ダイオード検波回路技術

ダイオードの大幅な低電圧化により、 μV オーダーの極低電圧下において高順電流を得られるダイオードのプロセス技術を確認する。加えて低電圧・低リーク電流で駆動する電磁波エネルギー回収用の集積回路技術を確認する。なお、上記開発品を用いた RF-DC 変換回路の電力変換効率 η は、入力信号レベル -20dBm 以下の環境下において 50%以上を目安とする。

3. 2. 1 RF-DC, DC/DC の性能目標

本研究開発においては、開発した変換回路への入力信号レベル -20dBm の環境下において、 1.5V 程度の電圧で、単層アンテナ 1m^2 当たり $100\mu\text{W}$ 以上の電力が継続的に出力可能となるようシステム設計を行うことが最終目標である。ここで、 1m^2 当たり約 50 個のアンテナが実装されるため、RF-DC 変換回路と DC/DC 回路に要求されるトータルの電力変換効率 η は $\eta=100\mu\text{W}/(-20\text{dBm}\times 50)=0.2$ となる。過去に発表されている RF-DC 変換回路と DC/DC 回路の性能を図 3-8 に示す。本研究開発での各回路に対する入力電力の設定状況を考慮し、RF-DC 変換回路に関しては入力電力が -20dBm 時、DC/DC 回路に関しては入力電力が数 μW 時と、各々の条件での電力変換効率に着目して目標設定を行った。具体的には両者とも世界トップレベルの性能となるように、RF-DC 変換回路の目標電力変換効率を 0.3、DC/DC 回路の目標電

電力変換効率を 0.7 として、トータルの電力変換効率 $0.3 \times 0.7 = 0.21 > 0.2$ を実現できるよう新たな目標値を導出した。これを基に、提案書において目標設定を行い、研究開発を開始した。また、上記の状況設定・目標設定において、課題アで電力束密度測定を実行した結果、RF-DC 変換回路へ到達する電波の電圧は mV オーダーであることが判明したことから、本研究開発においては mV オーダーの極低電圧下で目標達成を目指す研究開発を推進することとした。

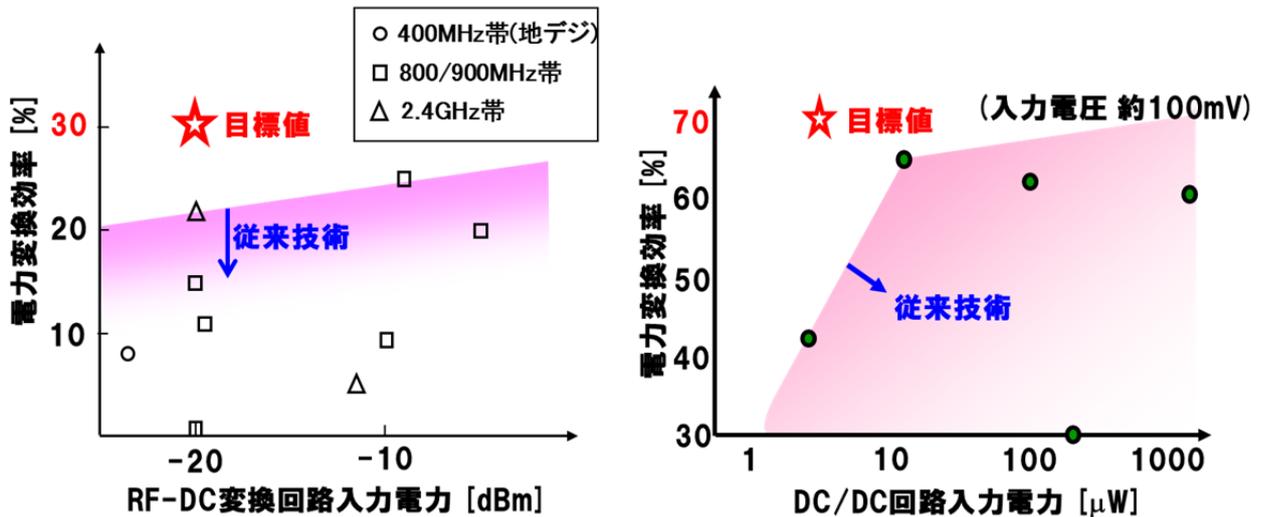


図 3-8 RF-DC 変換回路と DC-DC 回路の従来報告との性能比較

3. 2. 2 実測とシミュレーションによる方式検討および試作評価

高効率な RF-DC 変換回路を開発するためには、そのシミュレーション結果が実測結果と合うように整備された RF 基板パターンのシミュレーション環境が必要である。そこで、まずは本研究開発で用いる MEGTRON6 基板材料について、特性評価パターン等を搭載した評価基板を試作し測定を行った。結果をシミュレーション環境に反映することで、高効率 RF-DC 変換回路開発に向けた設計環境・手法を確立した。RF-DC 変換回路の高効率化に対しては、

- (1)ダイオードデバイスの改良による方法(個別部品使用 RF-DC)
- (2)ダイオード構成の工夫による方法(オンチップトランジスタ使用 RF-DC)

の 2 つの切り口から並行して検討を行い、最も RF-DC 変換回路の高効率化に有効な方式を決定する方針とした。

(1)の方法では、ダイオードデバイスのどこを改良すると RF-DC 変換回路の電力変換効率を改善できそうか検討するため、個別部品のショットキーダイオードについてフィジビリティスタディを行った。その結果、パッケージ寄生容量を除去した場合に電力変換効率改善効果の可能性があると知見を得た。そこで、パッケージ無しのショットキーダイオードデバイスを実装した RF-DC 変換回路を試作し、パッケージ品を実装した RF-DC 変換回路との比較評価を行った。結果としては、基板実装時の寄生容量成分を完全に除去することは難しく、電力変換効率改善効果は 3%以下程度にとどまることが分かった。

(2)の方法では、IC チップ内の高周波特性が RF-DC 変換回路の特性に影響を与えるので、IC チップ設計と基板設計を同時に精度よく取り扱えるシミュレーション環境が必要である。したがって、RF-DC 変換回路のチップ試作を行い、評価結果を用いて実測とシミュレーションの合せ込みを行った。またチップ試作の際、一般的な半波整流方式の他、全波整流方式や 2 アンテナ方式等の複数の RF-DC 変換回路方式をインプリし電力変換効率の相対的な比較評価を同時に行った。この試作評価により、IC チップ設計と基板

設計を同時に精度良く扱えるシミュレーション環境構築と、オンチップトランジスタ使用 RF-DC として最も高効率なダイオード構成の明確化を達成した。

次に(1)と(2)の検討結果を比較したところ、(2)のチップを用いる方法の方が、(1)の方法よりも大きな電力変換効率改善効果の可能性を示した。そこで、各回路パラメータの最適化を含め再度チップ試作を行い、RPHパネルに搭載する形状でRF-DC変換回路基板を対象となる3周波数帯それぞれについて製造した(図3-9)。試作チップにインプリしたRF-DC変換回路の方式は、新規提案である2アンテナ方式およびその発展方式である。評価実験の結果、前述の発展方式が最も高い電力変換効率を示し、目標値である30%を超えることを実機確認し、目標を達成した(図3-10)。

また電力変換効率改善の追加検討として、複数のアンテナからの入力電力をRF合成してRF-DC変換回路へ入力する方法と、RF-DC変換回路を通った後DC合成する方法についても検討を行った。シミュレーションで検討を行った結果、RF合成は信号の位相に関する感度が高く、各アンテナに到達する電波の位相が変動しやすい環境においては実運用が難しいことが分かった。一方、DC合成は出力が位相に左右されないため、RF-DC変換回路が出力する小さな電力をすべて足し合わせた後、DC/DC回路に入力することが全体の電力変換効率改善に貢献するような配置においては、有効な方法であることが分かった。しかしながら、今回のRPHパネルに関しては、各RF-DC変換回路とDC/DC回路間の配線がアンテナ特性にもたらす影響を考慮すると採用が難しく、この方法でも実装は行わなかった。



図 3-9 RF-DC 変換回路基板

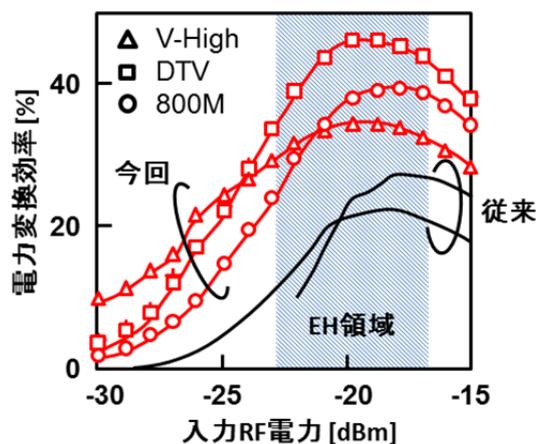


図 3-10 RF-DC 変換回路の電力変換効率

3. 3 電源回路構成技術

電磁波エネルギーから回収した電力を 1.5V 程度まで高効率（目安として、100mV 入力時の電力変換効率 50%以上）に昇圧可能な DC/DC 回路を実現する。また、充電など用に出力制御を行う低消費電力の電源 IC を開発する。この IC においては、無負荷時の自己消費電流は 50 μ A 以下とする。

3. 3. 1 DC/DC 回路設計

本研究においては、3.2.1 項で示したように RF-DC 変換回路の目標電力変換効率を 0.3、DC/DC 回路の目標電力変換効率を 0.7 とし、併せて電力変換効率 $0.3 \times 0.7 = 0.21 > 0.2$ を実現するための開発を行った。

まず、要素技術を確立するため、複数個のアンテナ(および RF-DC 変換回路)からの電力入力に対応し、電力変換効率の向上を図った DC/DC 回路の設計および評価を行った。その結果、入力電圧 100mV、出力電圧 1.5V 負荷 100 μ W で電力変換効率 70%が得られた。続いて、自己消費電流の低減技術を導入して電力変換効率を向上させるとともに、図 3-11 に示す RPH パネルに搭載するためのインターフェースを備えた DC/DC 回路の設計を行い、その DC/DC 回路を実装した電源 IC を開発した。なお、1m 角の RPH パネルは 50cm 角の子パネル 4 枚で構成され、各子パネルに電源 IC を 1 個ずつ搭載している。

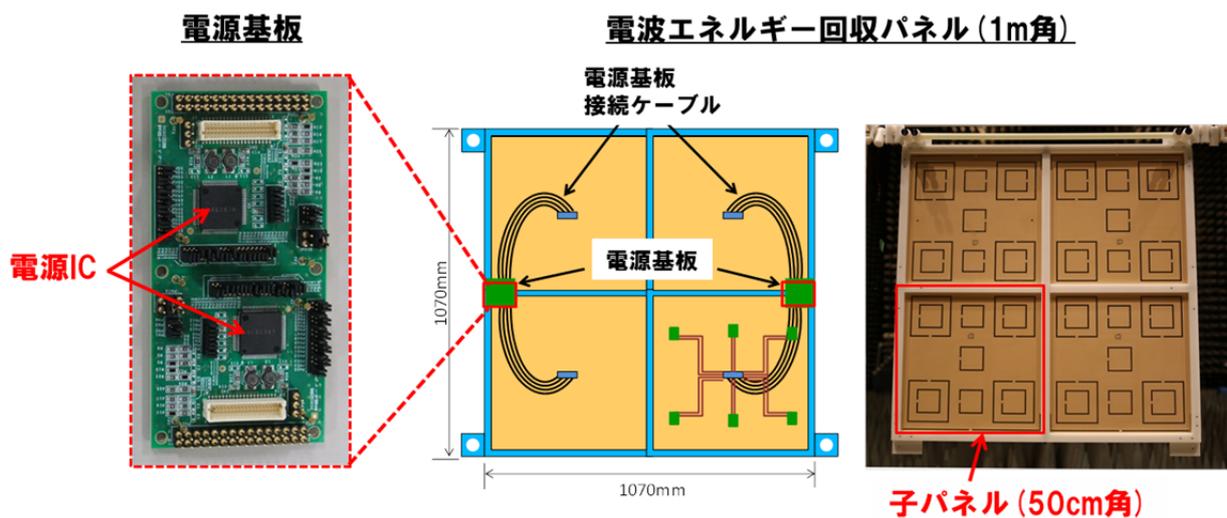


図 3-11 RPH パネルの構成

3. 3. 2 DC/DC 回路の評価結果

前記で設計した DC/DC 回路を評価した結果、100 μ W の負荷時に電力変換効率 78%が得られた。また、自己消費電流の評価を実施した結果、無負荷時の自己消費電流は 1m 角の RPH パネルに搭載する電源 IC(DC/DC 回路)4 個を合わせて 2.8 μ A であることを確認した。

3. 4 研究開発の効率的な実施

本研究では、目標達成に有効な複数の候補技術の中から本命を絞り込まなくてはならない局面が多く存在した。2 年という限られた研究期間内で研究成果を創出するため、フィージビリティスタディや小規模な試作評価を行い、効率良く技術の取捨選択を行うことで、開発期間の短縮化、低コスト化に貢献した。例えば、高順電流ダイオード検波回路技術の開発では、新規ダイオードデバイス製造および新規ダイオード構成を搭載した IC チップ製造を同時に実行すると、非常に高コストになってしまう上、最終的には効率

の高い成果物のみがパネル実装用に採用されることから、上記の製造工程を一度に進めるのは効率の観点で得策でない。そこで、初期段階ではフィージビリティスタディの実行や、特性評価用の試作等、何段階かに分けて両者の性能比較を実行し、無駄を省くため検討技術の細かな絞り込みを行いつつ、全体進捗とすり合せた上で効率的に開発を進め、限定された期間内に研究開発を終えることができた。最終的には、ICチップを利用した新規ダイオード構成を用いる RF-DC 変換回路基板を本命とすることに決定し、ICチップ製造のみを実行することで、技術開発の内、ダイオードデバイス製造に関する部分のコストを低減した。

また、2社間での研究開発を効率的に実施するため、両社の関係者のみができる Mailing List やクラウドのファイルサーバーを活用した情報の共有、並びに、適宜、電話会議を交えた技術打合せを頻繁に開催（10回実施）することで、京都－東京間の遠距離コミュニケーションの課題を克服し、円滑な研究開発運営を行った。

4 研究開発成果の社会展開のための活動実績

本研究開発成果は社会展開のため、株式会社国際電気通信基礎技術研究所では平成 24 年 11 月および平成 25 年 11 月に開催の ATR オープンハウスにてポスター発表を実施するとともに、平成 25 年には公開デモンストレーションもおこない(前章図 3-13 参照)、その成果は新聞 2 紙に掲載された。さらに、重要な会社来訪者向けの研究成果紹介においても、本成果を積極的にアピールし、研究開発期間中に国内外の機関・企業・団体等に対して合わせて 14 件余りのデモンストレーションを実施した。これ以外にも、株式会社国際電気通信基礎技術研究所ではワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアムのシンポジウムや実演展示会、ルネサスエレクトロニクス株式会社は Embedded Technology 2013 などの、国内主要フォーラムでの発表や、各種セミナー(電子ジャーナル Technical Seminar など)において成果紹介を行い、研究開発成果の普及・促進を継続的に行ってきた。

また、人材の確保・育成への取組みとしては、2 年間という短期の研究開発であることから、株式会社国際電気通信基礎技術研究所では即戦力となる研究員を 1 名雇用するとともに、この分野の将来を担う人材を育成する観点から大学院生のインターンシップを 2 名受け入れて(平成 24 年 10 月~12 月、延べ日数 23 人日)、OJT による育成指導を行った。

5 研究開発成果の社会展開のための計画

本研究開発は、環境に広く存在し、通信等に使われていない電磁波からエネルギーを回収する技術であり、単位面積当たりの起電力としては微小でしかないが、施設の壁面等への設置により受電面積を広げることで、起電力を増大することができる。そして、太陽電池と異なり、夜間や屋内でも電磁波があれば発電できることがメリットとなる。また、振動や圧電の発電と異なり、施設等の静的な環境で発電できることもメリットである(図 5-1)。

本研究開発の技術の派生的な展開として、周波数の動的制御が可能な電磁波シールドや、壁等への埋め込み型センサの電力源としての可能性もありうる。また、要素技術である高順電流ダイオードや低リークで高効率な電源回路構成技術は、電磁波よりも起電力の大きいと一般的に言われている振動等の他のエネルギーハーベストの基幹部品としても利用可能であり、それらの効率を高めることができる。従って、本研究開発成果との複合的なハーベスティング技術への展開も十分に期待できる(図 5-2)。

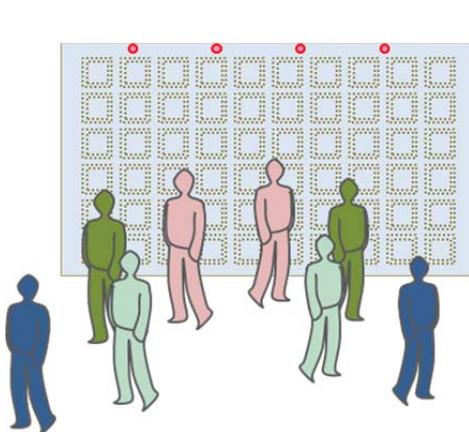


図 5-1 壁面に RPH パネルを設置したイメージ

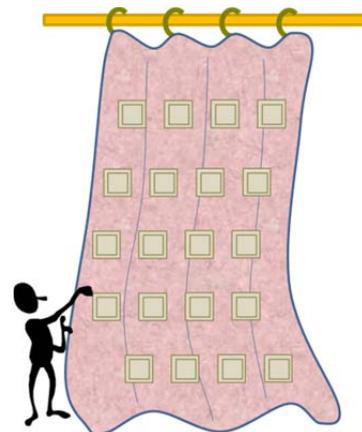


図 5-2 カーテン(緞帳)に、振動エネルギー回収と電磁波エネルギー回収を組み合わせたイメージ

さらに、エネルギーハーベスティングは、センサネットワークのネックとも言われてきた電池交換の問題を解決する技術であり、インフラ維持管理・更新マネジメント技術等への応用が有望である。例えば、喫緊の社会的課題である、高度成長期に構築され、耐用年数を越え始めているコンクリート構造物の点検メンテナンス用のセンサネットワークを実現するためのセンサ電源への貢献が期待できる。

本研究開発の成果については、引き続き国内主要フォーラムでの発表(予定としては Techno Frontier 2014、マイクロウェーブ展 2014)などでその成果の普及に努める。また、本研究開発の成果である電磁波エネルギー回収の要素技術の社会展開を推進し、社会ニーズを見極め、技術普及を目指す。

経済的な側面では、エネルギーハーベスティング技術の市場は右肩上がり成長しつつある分野であり(図 5-3)、世界市場では 2021 年には 3500 億円規模かそれ以上に達すると見込まれている。現時点では世界市場が先行しており、日本の市場形成は 10 年遅れているとも言われているものの、ICT の先進国である日本の基礎技術は十二分の素地があり、時期を見誤らずに適切な切り口で世界市場に参入する機会を得れば、産業の活性化にも貢献するものと期待している。

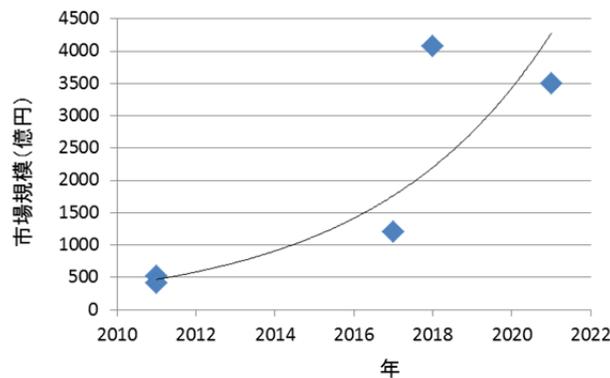


図 5-3 エネルギーハーベスティングの世界市場規模

Energy Harvesting Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, Nanotechnology や EE Times の記事を参照。1 米国ドル=80 円で換算 図中の曲線は指数関数を用いた近似曲線

6 査読付き誌上発表論文リスト

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1] S. Kitazawa, M. Hanazawa, S. Ano, H. Kamoda, H. Ban, and K. Kobayashi, “Field test results of rf energy harvesting from cellular base station” , 6th Global Symposium on Millimeter Wave (2013年4月23日) :
- [2] H. Kamoda, M. Hanazawa, S. Kitazawa, H. Ban, and K. Kobayashi, “Mutual coupling effect on rectenna array for RF energy harvesting” , 43rd European Microwave Conference, pp.503-506 (2013年10月9日) :
- [3] H. Kamoda, M. Hanazawa, S. Kitazawa, H. Ban, N. Kukutsu, and K. Kobayashi, “Design of rectenna array panel taking into account mutual coupling for RF energy harvesting” , 2014 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp.61-63 (2014年1月20日) :

8 その他の誌上発表リスト

9 口頭発表リスト

- [1] 北沢祥一、花澤理宏、“電磁波エネルギー回収技術”、ATR オープンハウス 2012 (京都) (2012年11月8日)
- [2] 小林聖、“電磁波エネルギーハーベスティング技術の研究開発～生活空間の電磁波を災害時などの電源に活用～”、ATR オープンハウス研究開発講演会 (京都) (2012年11月9日)
- [3] 北沢祥一、鴨田浩和、花澤理宏、阿野進、伴弘司、小林聖、“放送、通信用の電波を対象とした電磁波エネルギー回収の検討”、電子情報通信学会 マイクロ波研究会 (東京) (2013年1月17日)
- [4] 花澤理宏、鴨田浩和、北沢祥一、阿野進、中原久雄、伴弘司、小林聖、“受信電力測定による電磁波エネルギー回収の適用性検討～東北地方における測定～”、電子情報通信学会 2013年総合大会 (岐阜) (2013年3月19日)
- [5] 花澤理宏、鴨田浩和、北沢祥一、伴弘司、小林聖、“電磁波エネルギー回収用アンテナの広帯域化に関する一検討”、電子情報通信学会 2013年総合大会 (岐阜) (2013年3月20日)
- [6] 鴨田浩和、花澤理宏、北沢祥一、伴弘司、小林聖、“有限素子数レクテナアレーの動作素子パターン”、電子情報通信学会 2013年総合大会 (岐阜) (2013年3月22日)
- [7] 北沢祥一、鴨田浩和、花澤理宏、阿野進、伴弘司、小林聖、“放送、通信用の電波を対象とした電磁波エネルギー回収の検討”、電子情報通信学会 マイクロ波研究会 (京都) (2013年5月31日)
- [8] 鴨田浩和、花澤理宏、北沢祥一、伴弘司、小林聖、“相互結合を考慮した電磁波エネルギー回収用レクテナアレー構成の基礎検討”、電子情報通信学会 マイクロ波研究会 (京都) (2013年5月31日)
- [9] H. Kamoda, S. Kitazawa, M. Hanazawa, H. Ban, and K. Kobayashi, “Energy harvesting from multiple ambient RF sources”、第2回日英環境発電ワークショップ (東京) (2013年7月20日)
- [10] S. Kitazawa, H. Kamoda, H. Ban, N. Kukutsu, and K. Kobayashi, “Energy harvesting from broadcasting and cellular radio sources”、ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアムシンポジウム (東京) (2013年8月29日)
- [11] 鴨田浩和、花澤理宏、北沢祥一、伴弘司、久々津直哉、小林聖、“偏波依存性を利用した2周波 AMC

- 反射板をループアンテナに適用するための基礎検討”、電子情報通信学会 マイクロ波研究会（東京）（2013年9月13日）
- [12] 鴨田浩和、花澤理宏、北沢祥一、伴弘司、小林聖、“レクテナアレー素子パターンにおける整流回路インピーダンス非線形性の影響”、電子情報通信学会 ソサイエティ大会（福岡）（2013年9月18日）
- [13] 北沢祥一、鴨田浩和、“電磁波エネルギー回収技術”、ATR オープンハウス 2013（京都）（2013年11月7日）
- [14] 北沢祥一、鴨田浩和、伴弘司、久々津直哉、小林聖、“放送、通信に用いる3周波数帯からの電磁波エネルギーの回収”、無線電力伝送研究会（神奈川）（2013年11月22日）
- [15] 野口宏一朗、“微弱電波エネルギーを用いたエネルギーハーベスティングシステムの紹介”、Embedded Technology 2013（横浜）（2013年11月21日）
- [16] 野口宏一朗、“微弱電波エネルギーを用いたエネルギーハーベスティングの御紹介”、低エネルギーセンサネットワーク技術研究会（長野）（2014年2月5日）
- [17] 鴨田浩和、北沢祥一、久々津直哉、小林聖、“AMC 反射板上アンテナの動作インピーダンスに関する一検討”、電子情報通信学会 総合大会（新潟）（2014年3月19日）
- [18] 野瀬浩一、“エネルギーハーベスティングの無線センサネットワーク・マイコンシステムへの応用”、電子ジャーナル Technical Seminar（東京）（2014年3月11日）
- [19] 北沢祥一、“電磁波エネルギー回収技術”、ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム 実演展示会（京都）（2014年3月5-6日）

10 出願特許リスト

- [1] 鴨田浩和、花澤理宏、北沢祥一、伴弘司、小林聖、“共振周波数可変アンテナ、それを備えた電磁波エネルギー回収装置、及び共振周波数可変アンテナの調整方法”、日本、2013年3月22日
- [2] 花澤理宏、鴨田浩和、北沢祥一、伴弘司、小林聖、“共振周波数可変アンテナ及びそれを備えた電磁波エネルギー回収装置”、日本、2013年3月22日
- [3] 鴨田浩和、北沢祥一、伴弘司、久々津直哉、小林聖、“アンテナ装置および電磁波エネルギー回収装置”、日本、2013年8月26日
- [4] 池永佳史、“電源回路、及び電源回路の制御方法”、日本、2013年9月27日
- [5] 野口宏一朗、野瀬浩一、池永佳史、吉田洋一、“電源回路”、日本、2013年12月19日
- [6] 吉田洋一、“チャージポンプ型整流回路及びそれを備えた受信回路、無線電力回収回路”、日本、2014年3月31日
- [7] 池永佳史、“電源回路、及び電源回路の制御方法”、日本、2014年4月28日
- [8] 野口宏一朗、野瀬浩一、池永佳史、吉田洋一、“電源装置、及び電源装置の制御方法”、日本、2014年4月25日
- [9] 池永佳史、“電源回路、及び電源回路の制御方法”、日本、2014年5月14日

11 取得特許リスト

12 国際標準提案・獲得リスト

1 3 参加国際標準会議リスト

1 4 受賞リスト

[1]北沢祥一、電子情報通信学会 無線電力伝送研究会 特別講演功労感謝状受賞、2013年11月22日

1 5 報道発表リスト

(1) 報道発表実績

(2) 報道掲載実績

[1] “地デジとスマホの電波同時に効率発電”、日経産業新聞、2013年11月8日

[2] “TV電波を電力に”、京都新聞、2013年11月19日

1 6 ホームページによる情報提供

<http://www.atr.jp/expo/poster.html>、ATR オープンハウス 2013 での展示ポスターを公開、個別のカウンターを設けていないためヒット数は不明

研究開発による成果数

	平成 24 年度	平成 25 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0 件 (0 件)	3 件 (3 件)	3 件 (3 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
口頭発表数	6 件 (0 件)	13 件 (0 件)	19 件 (0 件)
特許出願数	2 件 (0 件)	7 件 (0 件)	9 件 (0 件)
特許取得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国際標準提案数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国際標準獲得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受賞数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)
報道発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報道掲載数	0 件 (0 件)	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)