

[招待講演] 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

北沢祥一 鴨田浩和 伴 弘司 久々津直哉 小林 聖

ATR 波動工学研究所 〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2

E-mail: {kitazawa, kamoda, hban, kukutsu, kobayashi}@atr.jp

あらまし 我々は、生活空間に存在している放送や通信用の電磁波を対象としたエネルギーハーベスティングの研究開発を行っている。本報告では、回収対象とする V-High マルチメディア放送(207.5-222MHz)、地上波デジタル放送(470-710MHz)、800MHz 帯携帯電話基地局(860-890MHz)の電力束密度を、放送用送信所から 11km までの見通し箇所で測定・評価した結果を示す。さらに開発した電磁波エネルギー回収用の 2 帯域、3 帯域アンテナの評価結果、および試作した RF-DC 変換回路と上記アンテナを組み合わせた、実環境における電磁波エネルギー回収実験の結果について述べる。

キーワード エネルギーハーベスティング, 電力束密度, アンテナ, RF-DC 変換回路

[Invited Talk] Energy Harvesting from Broadcasting and Cellular Radio Sources

Shoichi KITAZAWA, Hirokazu KAMODA, Hiroshi BAN, Naoya KUKUTSU and Kiyoshi KOBAYASHI

ATR Wave Engineering Laboratories 2-2-2 Hikaridai, Seika, Kyoto, 619-0288 JAPAN

E-mail: {kitazawa, kamoda, hban, kukutsu, kobayashi}@atr.jp

Abstract We have been conducting research and development of radio wave energy harvester that scavenges communication and broadcasting radio waves in common urban and suburban areas. The power flux density of V-high (207.5-222MHz), digital terrestrial broadcasting (470-710MHz), and mobile communication band (800MHz) radio waves were measured at the distances of up to 11 km from a TV broadcasting transmitter with line-of-sight conditions. Dual and triple band antennas that can capture those frequency bands were developed. Then, energy harvesting experiments were conducted under a real environment using the developed antennas with in-house RF-DC conversion circuits.

Keyword Energy harvesting, Power flux density, RF-DC conversion circuit

1. はじめに

生活環境に存在するエネルギーから電力を得る環境発電は、モノとモノを接続する M2M(Machine to Machine)に使われる無線センサネットワーク端末用の電源への応用などとして注目されている。回収源として光、熱、振動、電磁波などが挙げられ、さまざまな研究開発が行われている。この中で我々は、得られる電力は微弱であるが、環境に広範囲に存在する電磁波に注目し、郊外地域においても適用可能な、放送や通信の電磁波からのエネルギーハーベスティングの研究開発を行っている[1-5]。

この電磁波からのエネルギーハーベスティングは以前から様々な研究開発が行われており、Colorado 大

の Popovic らによる検討では、2-18GHz の広帯域レクテナアレーによる電磁波からのハーベスティングが報告されている[6]。また 2009 年には、シアトルにてテレビの送信所 (ERP=960kW) から 4km ほど離れた場所で、利得 5dBi のアンテナを用い 60 μ W を得たことが報告されている[7]。さらに国内では、東京大学の浅見らによって、東京タワー周辺での環境電磁界からの電力回収について検討が行われ、バッテリーレスセンサネットワークへの応用などが報告 [8-9] されているほか、横浜国立大の新井らによっても携帯電話基地局や FM 放送からの電力回収などが報告されている[10-13]。しかし、いずれも比較的都心部をターゲットとしており受信電力も高いエリアでの評価結果である。また最近

では, Pinuela らによってロンドン市内でのテレビ放送, 携帯電話基地局からの電磁波の電力束密度の評価と, エネルギーハーベスティングについて報告されている [14].

本報告では, 現在我々が行っている研究開発の概要を述べると共に, 回収対象の周波数帯を調査するためにフィールドで実施した電力束密度測定の結果について述べる. また, エネルギーハーベスティング用に開発した複数の周波数帯に対応するシート状アンテナの評価結果, そして開発したアンテナに RF-DC 変換回路を接続し, 実際に到来してくる電磁波からの電力回収実験結果について述べる.

2. 電磁波エネルギー回収システム

本研究開発で実現目標としている電磁波エネルギー回収システムは, 図 1 に示すように複数の周波数帯を受信可能で, かつ複数のアンテナを配置した 1 平方メートルのアンテナパネルと, アンテナで受信した電磁波を直流(DC)に変換する RF-DC 変換回路, DC を 1.5V 程度に昇圧する電源管理回路から成る. このシステムにおいて, アンテナ効率 80%, RF-DC 変換回路の変換効率 30%以上 (入力電力-20dBm 時) と, RF-DC 変換回路から得られた直流電圧を昇圧する電源管理回路での変換効率 70%以上を目標とし, システム全体として出力電圧 1.5V で 100 μ W 程度の電力を継続して取り出せる技術開発を行うものである.

使用シーンとしては建物の壁への貼りつけや, 屋外にパネル状に展開することを考えており, 平面型の電力回収システムの開発を計画している.

本研究開発は総務省の委託研究「電磁波エネルギー回収技術の研究開発」を平成 24 年度にルネサスエレクトロニクス株式会社と共同受託している [15].

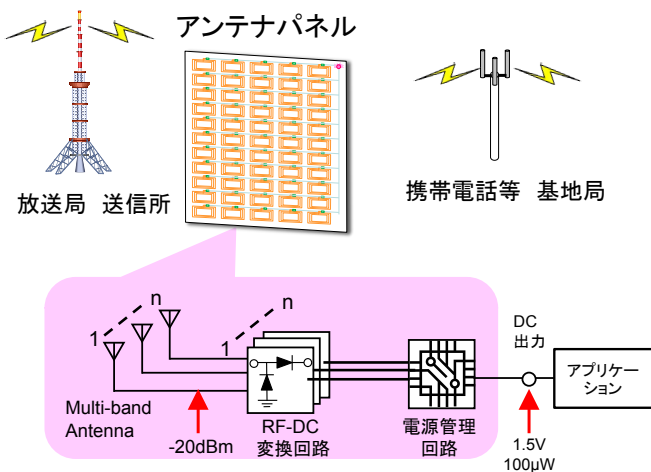


図 1. システムイメージ

3. 電力束密度の評価

電磁波エネルギー回収システムの設計にあたり, まず様々な地域, 環境でも安定して電力を回収できる放送・通信の電波 (周波数帯) を選定することとした. 周波数割当てや無線局免許の情報を参考に, FM 放送・V-Low マルチメディア放送 (76-108MHz), V-High マルチメディア放送 (207.5-222MHz), 地上波デジタル放送 (470-710MHz), 携帯電話基地局 (800MHz 帯, 900MHz 帯, 2.1GHz 帯等) を候補に, 電力束密度を ATR の所在地周辺である大阪, 京都, 奈良に加え, 東北地方などで測定した [4]. 測定には, 標準ダイポールアンテナとスペクトラムアナライザ (N9340B: アジレント・テクノロジー社製) を用いてそれぞれの帯域での受信電力を基に電力束密度を求め評価した. その結果 V-High, DTV, 800MHz 帯携帯電話基地局 (以降 800MHz) の 3 帯域が回収源として適していることがわかった.



図 2. 生駒山送信所と測定箇所

表 1. 生駒山までの距離と仰角

場所	距離 [km]	仰角 [度]
1. むかいやま公園	2.2	13.0
2. 南生駒	4.3	6.8
3. 学園前IC	7.2	4.7
4. 奈良先端大	8.2	4.0
5. ATR	10.9	3.3

以下, 奈良・京都地域の測定について詳細に分析した結果を述べる. 図 2 には, 京阪神地域の基幹テレビ送信所のある生駒山から距離に近い順に 5 地点の測定位置を示している. 測定場所 1 は生駒山麓にある「むかいやま公園」, 測定場所 2 は小高い山にある「南生駒」, 測定場所 3 は奈良市北部に通る自動車道のインターチェンジがある「学園前 IC」, 測定場所 4 は生駒市にある「奈良先端大」近くの開放地, 測定場所 5 は京都府

精華町にある「ATR」社屋の屋上である。これらの地点での生駒山までの距離と仰角は表1に示したようになっている。

図3は、図2に示した各地点における受信電力密度を3周波帯別に示している。このデータより、送信所に近くても電力束密度は高くないことがわかる。これは周囲環境による影響に加え、一般的にDTVの送信アンテナの垂直面指向性が、水平から2度程度チルトした方向にメインローブがあり、俯角が深い方向は利得が低いと考えられる。今回の5地点の測定で放送波の電力束密度が高かったのは場所2の南生駒で、送信所に近く、小高い山の上に位置し、仰角が小さい。

800MHzの電力束密度は携帯電話基地局の位置によるため、場所による差が大きいことがわかる。測定場所5のATRでは社屋から300m離れた場所に携帯電話基地局があるため、電力束密度が $200\mu\text{W}/\text{m}^2$ と他の地点より高い値が得られた。

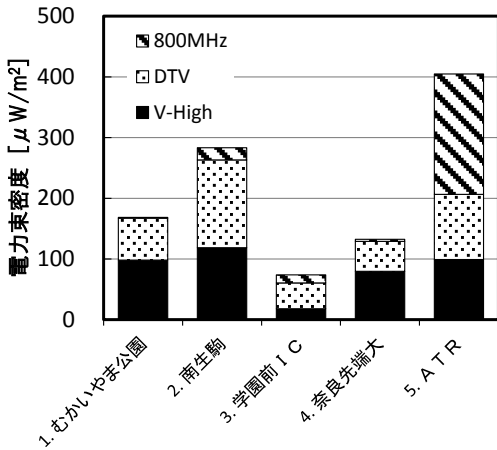


図3. 測定場所における電力束密度

4. アンテナ

本研究で開発する電磁波エネルギー回収システムのアンテナパネルには、低損失性、平面で実現する場合の加工の容易性、工作精度や特性の安定性、比較的安価である事、などが求められる。これらの観点から、現在リジッド基板上、およびシート状のフレキシブル基板上に銅箔パターンを形成することでアンテナを構成する手法での開発を並行して行っている。今回はそのうち Panasonic 製 液晶ポリマー基板 R-F705 を用いたフレキシブル基板でのアンテナについて紹介する。この基板は厚さ 0.1mm、2GHz における比誘電率が 3.0、誘電正接が 0.0008 である。

4.1.2 帯域アンテナ

図3からわかるように、多くの箇所では V-High およ

び DTV の電力束密度が支配的に高い。これら二つの周波数帯域に対応した2帯域アンテナの外観を図4に示す。500mm角のシートに V-High 用のアンテナは基板の端に設けた線幅 4mm のベント型ダイポールアンテナ、DTV 用のアンテナは広帯域化のため線幅が 8mm の Twin-loop アンテナとした。DTV 用のアンテナは基板上に2つ設け、その間隔はアンテナ中心部間で約 1/2 波長となる 300mm である。

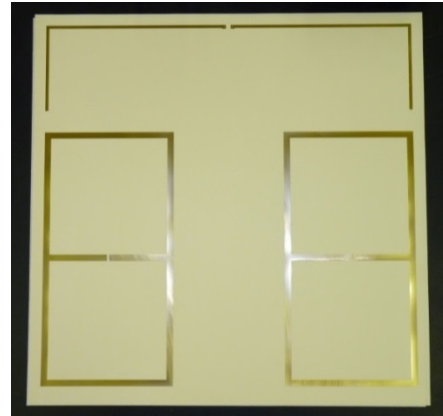
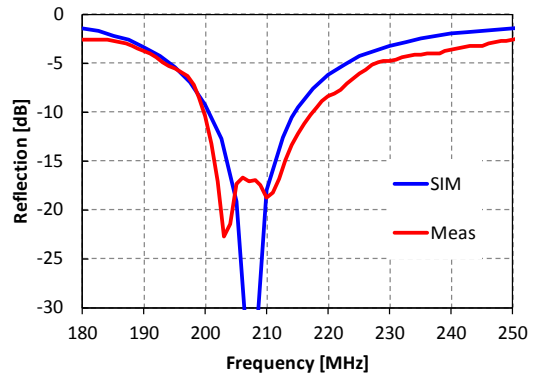
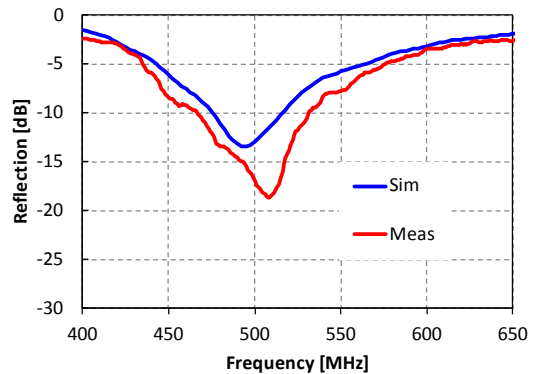


図4. V-High, DTV 用アンテナ



(a) V-High



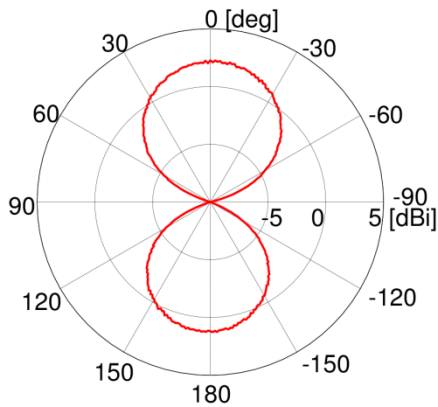
(b) DTV

図5. アンテナの共振特性

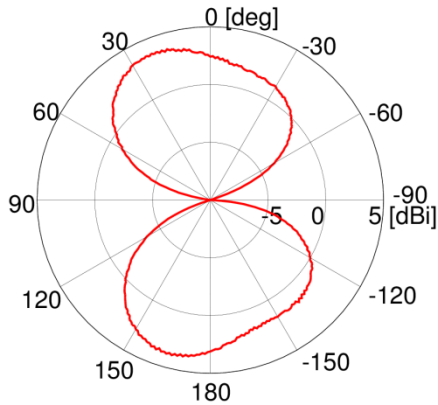
この構造にてソネットソフトウェア社のモーメント法シミュレータ SONNET を用いて解析した。共振特性をシミュレーションと実測値で比較すると、図 5 に示すように両帯域において良い一致を示した。表 2 に示すようにアンテナの利得もシミュレーションと良い一致を示した。測定した放射パターンを図 6 に示す。

表 2. 2 帯域アンテナの利得

	利得 [dBi]	
	Simulation	Measurement
V-High	1.8	2.2
DTV	5.1	5.1



(a) V-High 帯



(b) DTV 帯

図 6. 2 帯域アンテナの放射特性

4.2.3 3 帯域アンテナ

次に地域は比較的限られるが、場所によっては高い電力が得られる 800MHz 帯も回収することを狙った V-High, DTV, 800MHz に対応した 3 帯域アンテナを設計・試作した。図 7 に示すように、基板上部に V-High 用のペントダイポールを配し、DTV 用のループアンテナの内側に 800MHz 帯のループアンテナを配している。本アンテナも SONNET を用いて設計しており、シミュ

レーション及び測定したアンテナの共振特性を図 8 に示す。V-High は若干設計値より共振周波数が低くなっているが、3 帯域で概ね共振特性は一致している。

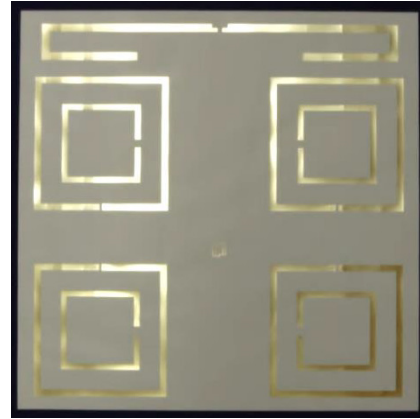
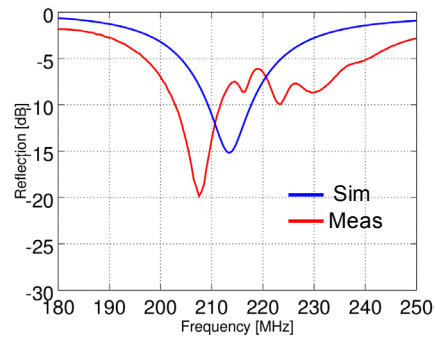
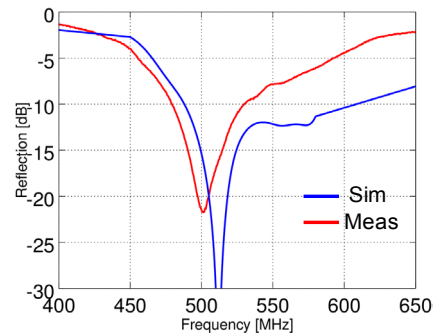


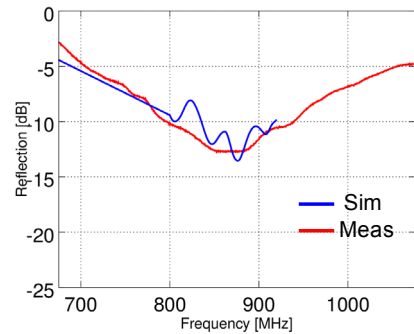
図 7. V-High, DTV, 800 MHz 帯用アンテナ



(a) V-High 帯

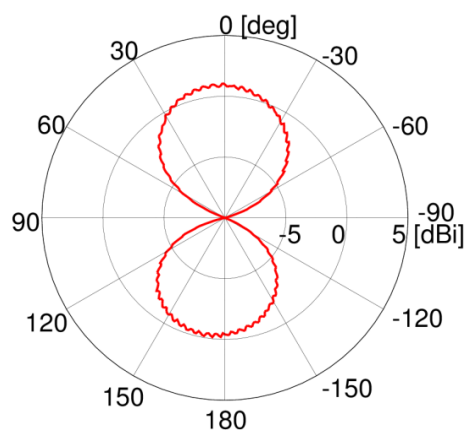


(b) DTV 帯

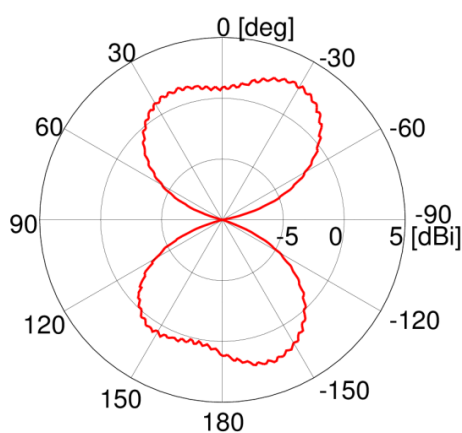


(c) 800MHz 帯

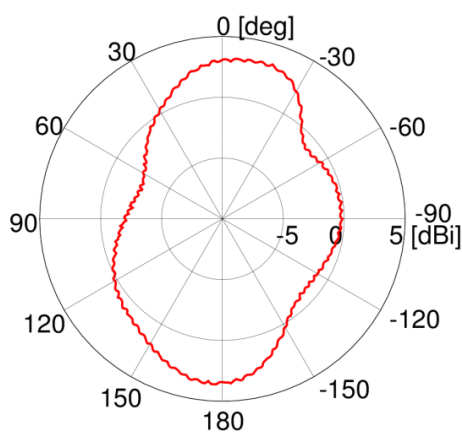
図 8. 3 帯域アンテナの共振特性



(a) V-High 帯



(b) DTV 帯



(c) 800MHz 帯

図 9. 3 帯域アンテナの放射特性

図 9 は各帯域でのアンテナの放射パターンである。DTV, 800MHz のアンテナは各 4 個あるため、一例を示している。各帯域においてアンテナの利得は表 3 に示すような結果が得られた。V-High の利得が低いのは、対象周波数の中心周波数で測定したが、試作アンテナの共振が図 8(a)に示すように低周波側にずれて整合がとれていないためであり、共振周波数の調整により改

善できる見込みである。また 800MHz 帯のアンテナのみシミュレーションより実測での利得が高い原因については更に検討中である。

表 3. 3 帯域アンテナの利得

	利得 [dBi]	
	Simulation	Measurement
V-High	2.0	1.0
DTV	3.9	2.8
800MHz	2.5	4.2

5. 回収実験

開発したアンテナに RF-DC 変換回路を接続して、ATR 社屋にて電磁波エネルギーの回収実験を行った。RF-DC 変換回路は、Avago 製のショットキーダイオード HSMS-285C を用いており、変換効率率は CW で -20dBm を入力時に 215 MHz で 9.1%, 500 MHz で 8.6%, 800 MHz 帯用が 8.4% である [16]。

電力の回収実験は V-High, DTV の 2 帯域アンテナを用い、図 10 のブロック図に示すように各 RF-DC 変換回路の出力端子を 20kΩ の抵抗で終端しその電力を評価した。結果を表 4 に示す。同表中、受信電力 (RX Power) は、開発した 2 帯域アンテナでの受信電力を示している。変換効率率が CW で評価した値にくらべ高効率になっているが、これは、V-High に関しては入力レベルが 4dB 高いことと、広帯域の信号が入力しているためである。実際に、CW で -20dBm 入力時の変換効率率が 9% の V-High 用 RF-DC 変換回路 (終端抵抗は 100kΩ) に、平均電力が -16dBm の CW と、実環境でキャプチャした V-High の波形を生成して入力したところ、変換効率率は、それぞれ 11%, 24% であった。

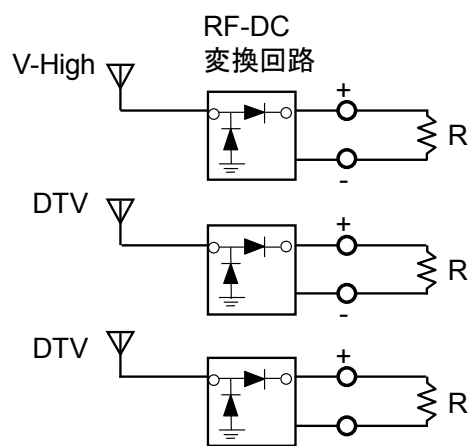


図 10. 電力回収のブロック図

表 4. 電力の回収実験の結果

	RX Power		DC output R=20kΩ		変換 効率
	[dBm]	[μW]	V[mV]	[μW]	
V-High	-16.03	24.95	464	10.76	42
DTV	-23.20	4.79	138	0.95	19

6. まとめ

生活環境に存在する放送・通信用の電波からのエネルギーハーベスティングの検討のため、対象となる210MHz帯のV-Highマルチメディア放送と500MHz帯のデジタルTV、800MHz帯の携帯電話基地局の電力束密度を測定した結果、放送波は見通し環境では安定した強度であること、また携帯電話は基地局の位置に依存するが場所によっては回収源として有望であることを確認した。またこれらの周波数帯に対応したエネルギーハーベスティング用のアンテナをシート状の基板に設計した結果、アンテナの性能はシミュレーションと良い一致を得た。開発したシート状アンテナとRF-DC変換回路を接続し、V-Highマルチメディア放送と500MHz帯のデジタルTVの2周波帯から電力回収の評価を実環境にて行った。その結果、V-Highでの変換効率は42%、デジタルTVでの変換効率は19%であった。

今後、目標とする1.5V 100μW程度の電力回収をめざし、アンテナの特性改善を行うとともに、実環境での電力回収について詳細な評価をおこなう予定である。

謝辞

本研究は、総務省委託研究「電磁波エネルギー回収技術の研究開発」により実施した。また電力束密度の測定を行った阿野進 研究員、花澤理宏 元研究員に感謝する。

文 献

- [1] S. Kitazawa, H. Ban, and K. Kobayashi, "Energy harvesting from ambient RF sources," Proc. 2012 IEEE MTT-S Int. Microw. Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, THU-B-2, pp.39-42, Kyoto, Japan, May 2012.
- [2] 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回路検討," 信学技報, vol. 112, no. 381, MW2012-143, pp.5-10, Jan. 2013.
- [3] S. Kitazawa, M. Hanazawa, S. Ano, H. Kamoda, H. Ban, and K. Kobayashi, "Field Test Results of RF Energy Harvesting from Cellular Base Station," Proc. of 6th GSMM, Sendai, Japan, April 2013.
- [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-, "2013年信学総合大, B-1-114 p.114, March 2013.

- [5] H. Kamoda, S. M. Hanazawa, Kitazawa, M. Hanazawa, H. Ban, and K. Kobayashi, "Mutual Coupling Effect on Rectenna Array for RF Energy Harvesting," Proc. of 43rd EuMC, pp.503-506, Nuremberg, Germany, October 2013.
- [6] J.A. Hagerty, F.B. Helmbrecht, W.H. McCalpin, R. Zane, and Z.B. Popovic, "Recycling ambient microwave energy with broad-band rectenna arrays," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.52, pp1014-1024, 2004.
- [7] A. Sample and J.R. Smith, "Experimental results with two wireless power transfer systems," Proc. IEEE Radio and Wireless Symposium, MO2A-5, pp.16-18, San Diego, USA, Jan. 2009.
- [8] 塚田恵佑, 川原圭博, 浅見徹, "環境電磁界からの電力再生を目指した東京都内電波分布調査," 2009 信学総大, B-20-3, p.607, March 2009.
- [9] 西本寛, 李云, 川原圭博, 浅見徹, "環境電磁界からの電力再生を用いた無線センサネットワークプロトタイプ," 2010 信学総大, B-20-59, p.643, March 2010.
- [10] C. Mikeka and H. Arai, "Design of a cellular energy-harvesting radio," Proc. 2nd European Wireless Technology Conf., pp.73-76, Rome, Italy, Sep. 2009.
- [11] C. Mikeka and H. Arai, "Development of a Batteryless Sensor Transmitter," Proc. IEEE Radio and Wireless Symposium, pp.64-71, New Orleans, USA, Jan. 2010.
- [12] 新井宏之, ミケカチョモラ, "電磁波による環境発電の課題," 信学技報, Vol.111, No.200, AP2011-72, pp.43-46, Spt. 2011
- [13] 新井宏之, 吉田稔, ミケカチョモラ, "FM放送波を回収する直流出力増加効果を有するレクテナの検討," 信学技報, Vol.112, No.53, AP2012-23, pp.65-68, May.2012
- [14] M. Pinuela, P.D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, "Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.61, pp.2715-2726, 2013.
- [15] 総務省 電磁波エネルギー回収技術の研究開発基本計画書
www.soumu.go.jp/main_content/000151339.pdf
- [16] 北沢祥一, 鴨田浩和, 花澤理宏, 阿野進, 伴弘司, 小林聖, "放送、通信に用いる3周波数帯からの電磁波エネルギー同時回収の検討," 信学技報, Vol.113, MW2013-19, pp.53-58, May.2013.