

# ビームフォーミングアンテナを用いた移動体への無線電力伝送に関する研究

研究代表者 沢田 浩和 東北大学電気通信研究所 助教

## 1 サマリ

レトロビームフォーミングアンテナ[1]と高利得増幅器を用いた移動体端末用無線電力伝送システムについての実験結果を報告する。周波数 2.4GHz で行った実験結果から、利得 36dB の増幅器を使用することで伝送距離 0.5m において、端末からの送信電力に対して 2.6 倍 (4.57dB) に増幅された受信電力が端末側で得られることを確認した。また端末の位置が移動してもレトロビームフォーミングアンテナの機能により、増幅された電力が端末側で得られることも確認できた。本結果から、提案する方式で移動する端末への電力供給の可能性を見いだすことができ、今後は端末を効率よく充電するために受信電力/送信電力の利得を大きくするための効率化を目指す。

## 2 研究の背景と目的

従来、宇宙太陽光発電に代表される長距離の無線電力伝送が長年研究されてきたが、最近になり、2007 年に MIT (米マサチューセッツ工科大) のグループにより、送電コイルから 2m 離れた電球を点灯させるという実証実験が行われ[2]、ここから近距離の無線電力伝送が急激に注目されるようになった。その後、米インテルも 2008 年には、同様に磁場共鳴を利用した無線電力伝送の開発を行っていることを発表している[3]。国内においては、東京大学のグループによるシート型の無線電力伝送装置が実現されており[4]、セイコーエプソン、村田製作所[5]、ソニー[6]などの日本企業も各研究成果を公表している。但し、これらの成果は移動体への電力を供給する目的ではないため、ワイヤレスの恩恵を十分に受けられない。そこで移動体への電力供給が次の段階として検討し始められている。龍谷大学の栗井教授のグループは 2.45GHz のマイクロ波を用いて、自動車への電力伝送を目的とした実験的な検討を行っており[7]、企業では既に実証実験も行われている[8]。

本研究では、レトロビームフォーミングアンテナを用いて、移動体端末から発信された信号を増幅して返送することにより端末側の充電を行う手法について検討し、その実現可能性についての基礎実験を行う。レトロビームフォーミングアンテナを用いることで、端末の方向を探する必要なく受信した信号を端末の方向に返送することができるため、ビーム制御に複雑な制御回路は不要となる。またビームフォーミングアンテナの素子数を増やすことで、アンテナ利得を増加させて、効率の高い電力伝送も実現できる。本提案方式は端末側からの信号を増幅して返信するため、常に電力を送り続ける必要はなく、送信側の蓄電池の電圧が予め設定した閾値を下回った時点で、端末から信号を出すようにすることで、無駄のない電力伝送が可能である。移動体への無線電力伝送が実現すれば、携帯電話やノートブック PC などの携帯端末を持って移動しながらでも充電が可能となる。

## 3 レトロビームフォーミングアンテナを用いた電力伝送

ビームフォーミングアンテナ技術の 1 つに、2 つのフェーズドアレイアンテナを組み合わせて、受信した電波を受信した方向に再放射するレトロビームフォーミングアンテナがある。その構成は単純であり、送受信 2 対のフェーズドアレイアンテナを同じ方向へ向けて配置し、2 つのアレイアンテナ素子間を端から交差させるように結線することで、各素子で受信した信号の位相関係を対称に折り返して送信信号とし、受信波と送信波の方向を一致させることが可能となる。このレトロビームフォーミングアンテナに高利得な増幅器を付加することで、図 1 のように移動端末側から送信された信号を基地局側で増幅して端末側へ送り返し、端末の送信電力よりも受信電力が上回ることで、端末に搭載した 2 次電池に電力を充電することが可能となる。本研究では、この方式の実証試験を行い実現の可能性を見いだす。

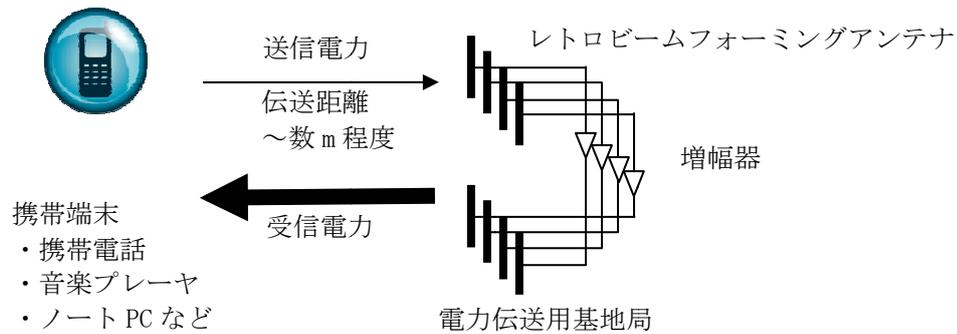


図1 レトロビームフォーミングアンテナを用いた移動体への無線電力伝送システム

#### 4 使用周波数および回線設計の検討

図1に示す無線電力伝送システムに適した周波数を選定するため、現在の電波法をもとに使用可能な周波数帯を検討した結果、420MHz、920MHz、2.4GHz帯の3周波数帯を候補として回線設計を行うことにした。各周波数帯を比較した結果、表1に示すように端末へ電力を送信する基地局側の送信電力とアンテナ利得の制限、および伝搬損失を考慮すると、1m伝送時の受信可能電力では920MHz帯が最も有力な候補となる。しかし、基地局側のアレイアンテナのサイズを考慮すると、半波長間隔で素子を配置した場合に、周波数の低い420MHz、920MHz帯は屋内用途では大型化して非現実的となるため、今回は周波数の高い2.4GHz帯で検討することにした。例として、図1に示すダイポールアンテナで構成した場合、半波長間隔の4素子アレイとすると基地局側の送受信アンテナは25cm×20cm程度のサイズが想定される。またFR-4基板(比誘電率:4)上に2.4GHz帯でパッチアンテナを構成すると、1素子が31mm角程度のサイズとなるため、アンテナは送受信で10×22cmのサイズになりダイポールの場合に比べ、1/2程度に小型化できる。

表1 使用可能周波数帯での比較

周波数帯	420MHz	920MHz	2.4GHz
最大送信電力	10dBm	24dBm	10dBm
最大アンテナ利得	2dBi	3dBi	12dBi
伝搬損失@1m	25dB	32dB	40dB
1m伝送時の受信可能電力	-13dBm	-5dBm	-18dBm
アンテナサイズ			
半波長ダイポール1素子	357mm	163mm	62.5mm
パッチアンテナ1素子	179*179mm	82*82mm	31*31mm

※1 ガラスエポキシ多層材料特性 (日立化成工業)

<http://www.hitachi-chem.co.jp/japanese/products/bm/b01/004.html>

標準的なパッチアンテナの利得が6dBi程度であることから、基地局側にアレイアンテナを構成する場合、12dBiの最大利得を実現するには4素子アレイアンテナ(アレイ化利得+6dB)とすれば良い。この検討結果から、2.4GHz帯で無線電力伝送の回線設計を検討した結果を表2に示す。アプリケーションとして、オフィス環境で自分のデスクの周辺で利用する場合を想定し、伝送距離を1mと仮定すると、表1から基地局側の送信電力、アンテナ利得の制限のために、端末での受信電力は-12dBmとなる。よって端末から送信する電力が-12dBm以下であれば、端末側の受信電力は送信電力を上回り、端末の2次電池に充電可能となる。表2では送信電力が-20、-30dBmの場合を示しているが、それぞれ8、18dBmの充電用電力利得が得られる見込みとなる。但し、送信時の直流→交流変換、受信時の交流→直流変換の効率を80~90%と仮定すると、さらに1dBの効率低下を見込む必要がある。また2.4GHz帯を選択したことで伝搬損失が大きくなるため、端末に充電可能な伝送距離は数m以内に制限される。よって屋内で移動しながら端末に充電を行うためには、図2に示すように基地局をいくつか設置することで対応する必要がある。

表2 2.4GHz帯を用いた無線電力伝送の回線設計例

	端末送信電力 -12dBmの場合	端末送信電力 -20dBmの場合	端末送信電力 -30dBmの場合
端末送信電力[dBm]	-12	-20	-30
端末アンテナ利得[dBi]	6	6	6
1m伝送時の伝搬損失[dB]	-40	-40	-40
基地局アンテナ利得[dBi]	12	12	12
基地局受信電力[dBm]	-34	-42	-52
基地局増幅器利得[dB]	44	52	62
基地局送信電力[dBm]	10	10	10
基地局アンテナ利得[dBi]	12	12	12
1m伝送時の伝搬損失[dB]	-40	-40	-40
端末アンテナ利得[dBi]	6	6	6
端末受信電力[dBm]	-12	-12	-12
端末受信電力/端末送信電力[dB]	0	8	18

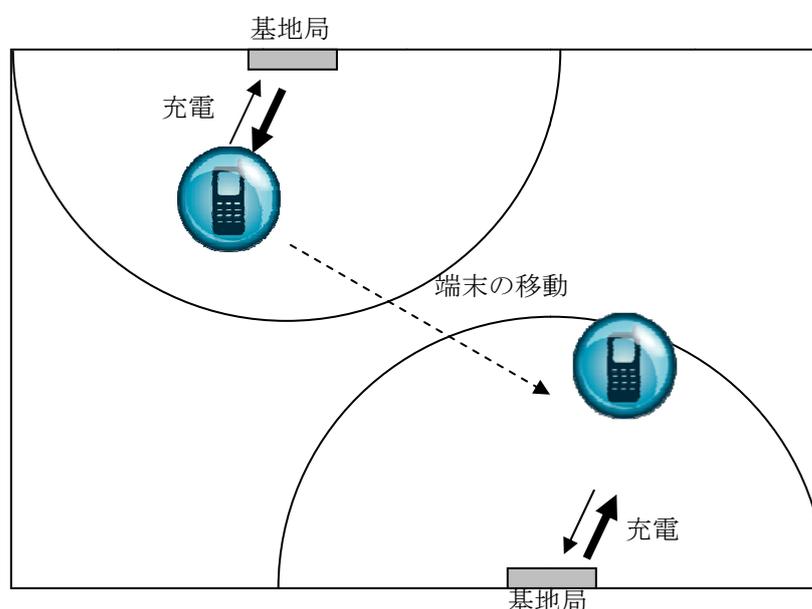


図2 複数の基地局設置による屋内カバーエリアの増大

## 5 ビームフォーミングアンテナ解析

提案するレトロビームフォーミングアンテナを利用した無線電力伝送では、使用するアレイアンテナの素子間隔により、移動端末をカバーできる電力送信エリア（角度範囲）が決定される。そこで素子間隔とカバーできるビーム走査角範囲について解析を行った。例として図3の4素子ダイポールアレイアンテナを仮定した場合、エネルギーのロスとなるサイドローブが出ないように素子間隔を半波長とした場合を基本に±0.1波長変化させると、素子間隔を広くするほど、最大利得は増加するがビーム走査角は狭くなることが分かる。適切なビーム走査角範囲は部屋の構造と基地局の設置場所にも依存するが、120°程度のカバーエリアを考慮すると半波長間隔が適していることが明らかとなった。

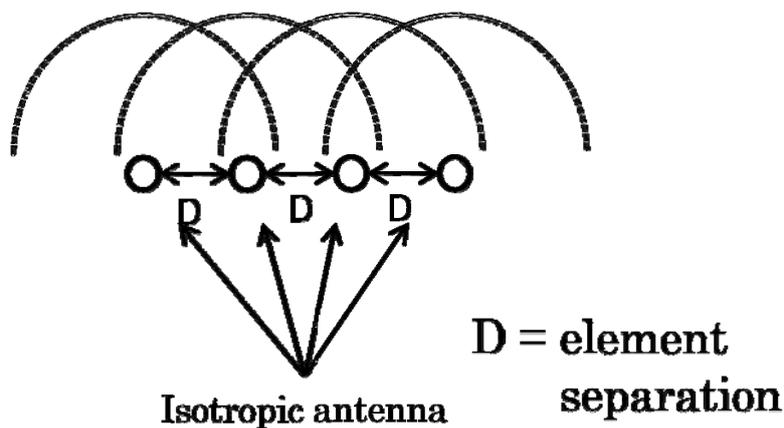


図3 4素子アレイアンテナの指向性シミュレーションモデル

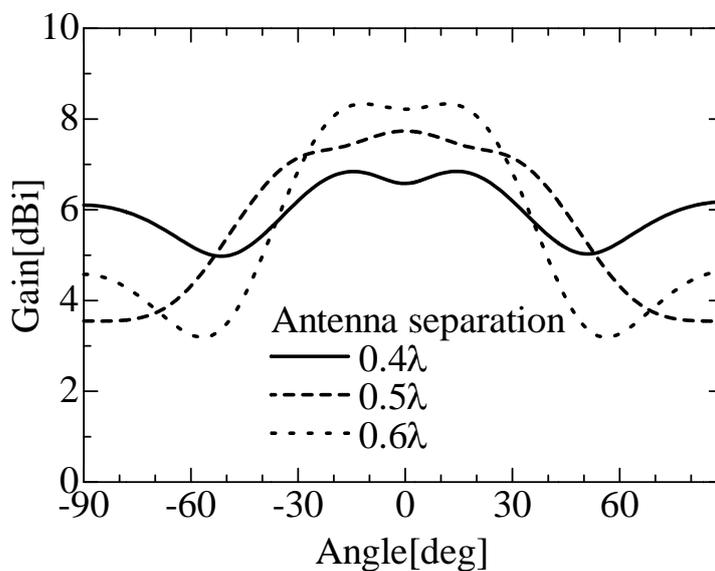


図4 ビームフォーミングアンテナ素子間隔とビーム走査角範囲

## 6 2.4GHz 帯を使用した電力伝送実験

アレイアンテナサイズの検討結果から、電力伝送実験は 2.4GHz 帯で行った。端末側の送受信アンテナには無線 LAN 用のロッドアンテナを使用し、基地局側はレトロビームフォーミングアンテナとして、シミュレーションと同等の特性が期待できる反射板付き 4 素子モノポールアレイアンテナ 2 対を製作し、36dB の高利得増幅器 4 台を付加した。

### 6-1 端末用送受信ロッドアンテナの反射特性

端末用の送受信アンテナには図 5 に示す 2.4GHz 無線 LAN 用のロッドアンテナを使用した。図 6 に示す反射特性の測定結果より、2.4GHz 帯を中心に 400MHz の帯域で-15dB 以下となり使用可能であることを確認した。



図5 2.4GHz帯ロッドアンテナ (A:Tx用, B:Rx用)

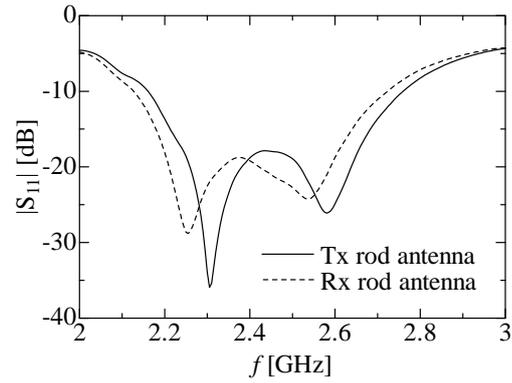


図6 ロッドアンテナの反射特性

### 6-2 反射板付きモノポールアレイアンテナの反射特性

レトロビームフォーミングアンテナに使用する図7の反射板付きモノポールアレイアンテナ各素子の反射特性について測定した結果を図8, 9に示す。全ての素子で2.4GHzでの反射特性は-10dB以下となり、使用可能であることを確認した。送受2対のアレイアンテナはレトロビームフォーミングアンテナを構成するように裏面で配線をクロスするようにして接続する。

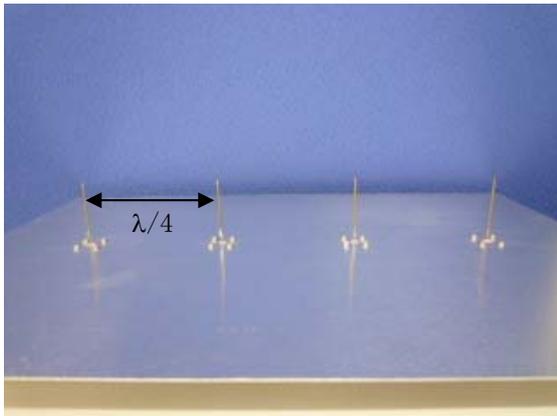


図7 反射板付き4素子モノポールアレイアンテナ

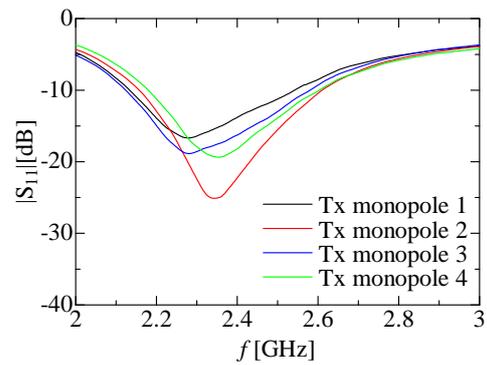


図8 モノポールアンテナ素子の反射特性 (受信側)

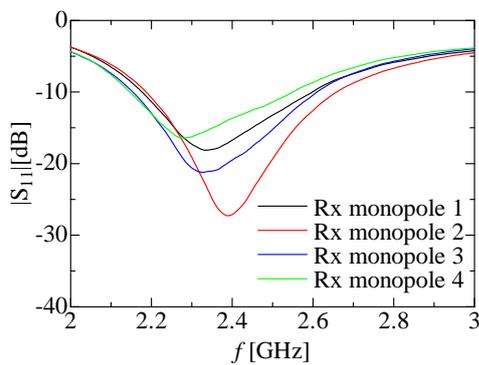


図9 モノポールアンテナ素子の反射特性 (送信側)

### 6-3 増幅器の周波数特性

レトロビームフォーミングアンテナに付加する増幅器は汎用品を使用し、図10に示す2.4GHz帯での利得測定の結果から36dB程度の利得が得られることが分かった。

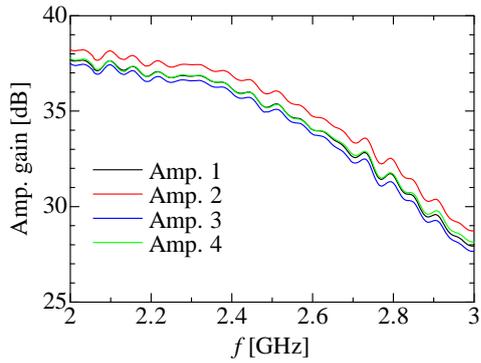


図 10 増幅器の利得周波数特性

#### 6-4 電力伝送実験

端末ー基地局間の距離を 1m として、図 11 のようにレトロビームフォーミングアンテナの正面方向に端末側のアンテナを配置して、増幅器の ON/OFF 時の端末側の送受信電力比を測定した。その結果、図 12 のように増幅器を ON とすることで受信電力が増幅器の利得分増加することが確認できた。そこで端末ー基地局間の距離を 0.5m として実験を行った結果、図 13 のように端末の受信電力が送信電力を上回り、送信電力の 2.6 倍 (4.57dB) の受信電力が得られることが確認できた。またビームフォーミングアンテナの機能を確認するため、図 14 のように端末側のアンテナ位置を正面から 15° ずらした場合の送受信電力比を測定した結果でも、受信電力が送信電力を上回ることが確認できた。

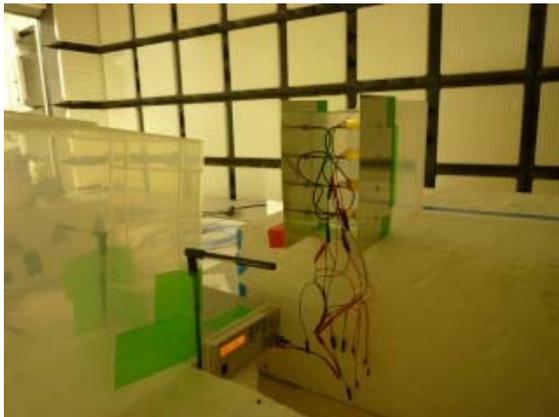


図 11 電力伝送試験 (正面方向  $\phi = 0^\circ$ )

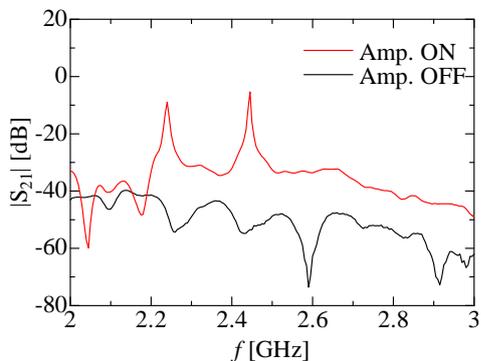


図 12 増幅器 ON/OFF による受信電力特性 (端末ー基地局間距離 1m)

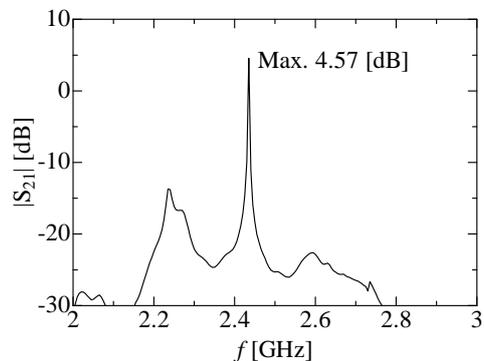


図 13 端末ー基地局間距離 0.5m での電力増幅特性

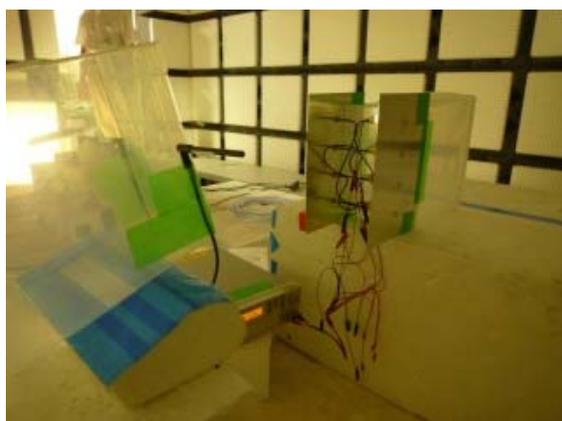


図 14 電力伝送試験（正面から  $\phi=15^\circ$  方向）

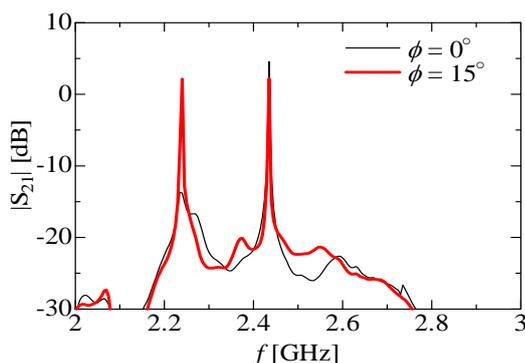


図 15 端末側アンテナ位置を変えた場合の電力増幅特性（端末－基地局間距離 0.5m）

## 7 まとめ

本報告書では、提案するレトロビームフォーミングアンテナを用いた電力伝送方式により、移動体する端末への電力供給の可能性を見いだすことができ、今後は端末を効率よく充電するために受信電力/送信電力の利得を大きくするための効率化を目指す。

### 【参考文献】

- [1] アンテナ工学ハンドブック、p226、電子情報通信学会編、オーム社
- [2] “ワイヤレス電力供給技術”、日経エレクトロニクス  
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/WORD/20070326/129509/>
- [3] “ワイヤレス電源”、日経ビジネス、  
<http://business.nikkeibp.co.jp/article/manage/20090518/194976/>
- [4] “世界初、ワイヤレス電力伝送シート”、東京大学  
[http://www.ntech.t.u-tokyo.ac.jp/Research/Research\\_wireless/documents/wireless\\_handout\\_jp.pdf](http://www.ntech.t.u-tokyo.ac.jp/Research/Research_wireless/documents/wireless_handout_jp.pdf)
- [5] “セイコーエプソンと村田製作所、非接触で給電する「携帯型充電器」を試作” Tech-on  
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20081125/161805/?ST=device>
- [6] “磁界共鳴型を使った高効率な「ワイヤレス給電システム」を開発”、Sony Japan  
<http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200910/09-119/index.html>
- [7] “初めて電気自動車（EV）の走行中充電を可能とする 新技術「移動式ワイヤレス電力伝送」をマイクロ波で実現”、龍谷大  
<http://www.ryukoku.ac.jp/news/detail.php?id=600>
- [8] “昭和飛行機工業/電磁誘導方式でEVバスでの実用化に成功”、リクナビ  
[http://rikunabi-next.yahoo.co.jp/tech/docs/ct\\_s03600.jsp?p=001677](http://rikunabi-next.yahoo.co.jp/tech/docs/ct_s03600.jsp?p=001677)

### 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
2層スーパーゲインアンテナを用いた2.4GHz無線LAN用高利得ビーフォーミングアンテナ	電子情報通信学会ソサイエティ大会論文集	2012年9月