

電界共振結合型ワイヤレス電力伝送

Wireless Power Transfer via Electric Coupling

増田 満 ^{*1}
Mitsuru Masuda

楠 正弘 ^{*1}
Masahiro Kusunoki

小原 大輝 ^{*1}
Daiki Obara

中山 裕次郎 ^{*1}
Yujiro Nakayama

浜田 浩樹 ^{*1}
Hiroki Hamada

根上 昭一 ^{*1}
Shoichi Negami

貝塚 啓 ^{*2}
Kei Kaizuka

概要 平面電極と平面コイルを用いて電界によってワイヤレスで電力を給電する研究を行っている。電界を用いた無線電力伝送は空気中の絶縁破壊電圧の制限を受けるために、極近傍領域での電力を給電するシステムの検討が行われているに過ぎない。本論文では送受電距離 200 mm において給電効率 90% 以上の電力伝送が可能であることを実証した。また実際に電力伝送を行い 300 W の電力が伝送できることを実験により確認した。更に送電と受電間の位置ズレが生じても方向によっては磁界方式より広い指向性を有していることが判明した。

1. はじめに

無線で電力を給電する技術の研究が盛んである。磁界共鳴と命名された研究によって近距離のエネルギー伝送が可能であることが 2007 年に米国のマサチューセッツ工科大学で証明されたためである^{1), 2)}。この現象は電界でも成立する³⁾。しかしながら電界を用いたワイヤレス電力伝送は空気中の絶縁破壊強度の限界や人体が誘電体であることに起因する影響があるため、ごく近傍領域で電力を供給する研究に留まっていた。

ISM 帯 (Industrial, Scientific and Medical Band) の周波数である 13.56 MHz および 27.12 MHz を用いて、電界を主たるエネルギーとして Q 値の大きな共振回路で電力伝送すると、送受電間の距離を離した状態でも電力伝送できると考えられる。しかし電極形状によっては放射電磁界が大きくなり、共振現象による電力伝送作用である誘導界や静電界のエネルギーを有効に活用できないという欠点が予想される。このため送電と受電間の距離を離した状態での電界を用いたワイヤレス給電の検討はあまり行われていない。

我々は LC 直列共振構造を用いて放射電磁界が少なく、電界共振結合作用によって高効率な電力伝送が可能であることを電界シミュレーションによって示し、電源部および受電部を試作し大きな電力をワイヤレスで伝送できることを実証したので、以下に報告する。

2. 電界共振結合によるワイヤレス給電の検討

2.1 磁界および電界を利用したワイヤレス給電

ワイヤレスでエネルギーを伝送する空間を考えると、エネルギーを伝える物質が存在する音波などの方式と、場 (フィールド) によるエネルギー伝送に分けられる。場は電場と磁場に分けられる。電気工学の分野では電場を電界、磁場を磁界と表現されることが多い。

システムを物理的に考えワイヤレス給電方式を分類すると、(1) 電界を利用 (2) 磁界を利用 (3) 電界と磁界を利用 (電磁波・光) (4) 音波を利用などが挙げられる。

このうち (3) の電界と磁界を利用したエネルギー伝送は 20 世紀初頭に Nikola Tesla が行った実験が示すように、古くから研究されており、最近では宇宙太陽発電所 (Space Solar Power System) などの研究も盛んである。

一方、磁界を用いたワイヤレス電力伝送は、近年になって電磁誘導方式の Qi (チー) 規格に基づいて携帯端末を始めとする幅広い機器に適用されている。また RFID (Radio Frequency Identification) などは意識せず多くの人が使っているワイヤレス給電システムである。

電界結合を用いたワイヤレス給電は一部の研究機関で検討が進められている。

2.2 電界結合共振を利用したワイヤレス給電について

電界によるワイヤレス給電は空気中の絶縁破壊電圧で制限される⁴⁾。一方磁界によるワイヤレス給電は放電に相当する現象が無いため、非常に大きなエネルギーが電力伝送できると考えられている。電界と磁界のエネルギー給電量の許容値は 9 析以上の差があると考えられている。更に電界によるワイヤレス給電は、送電と受電間の電極距離が離れると静電容量が減少するため、ワイヤレス電力伝送に不利になる状況が生じると考えら

*1 研究開発本部 自動車電装技術研究所

*2 産業電線・機器事業部門 エネルギーパックキャストグループ

れている。しかしながらEMC (Electro-Magnetic Compatibility) の観点からは電界は距離の3乗分の1で減衰するため、他の機器に影響を与えるにくいという利点も考えられる。

そこで、我々は磁界型と電界型の比較検討を行った。磁界共振結合方式のブロック図は図1で、電界共振結合のブロック図は図2で示すことができる。

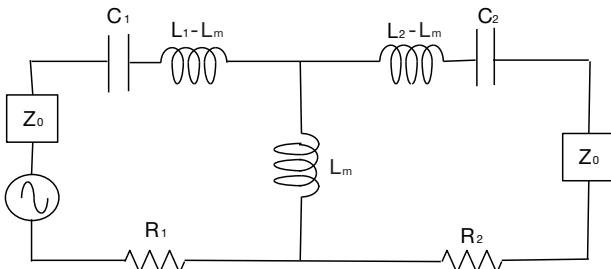


図1 磁界共振結合方式ブロック図
Magnetic resonance type block diagram.

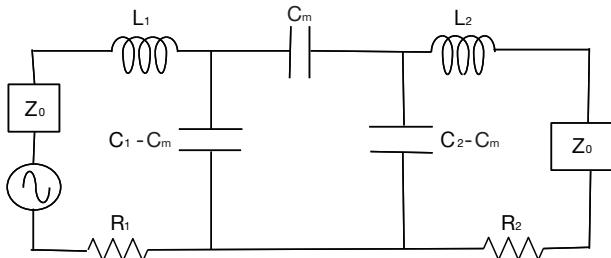


図2 電界共振結合方式ブロック図
Electric coupling type block diagram.

図1において L_1 は給電コイルのインダクタンス、 L_2 は受電コイルのインダクタンスであり、 C_1 、 C_2 は送電および受電用の共振コンデンサである。 R_1 、 R_2 は送電および受電側の交流抵抗、 L_m は磁界共振結合における結合インダクタンスである。

図2において C_1 は送電側のキャパシタンスであり、 C_2 は受電側のキャパシタンスであり C_m は電界共振結合における結合容量である。

角周波数を ω とすると、磁界共振結合においては、 $\omega(L_1-L_m)$ と $\omega \times L_m$ の比が出力となり、電界共振結合においては $\omega \times L_1$ と $1/\omega(C_1-C_m)$ の比が出力となる。つまり C_1 と C_m の差が小さければ電界でも高効率に電力伝送できるものと考えた。

システムは $118\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ の2枚の平板電極に L_1 および L_2 を外付けコイルで実験し、直列共振型の電力伝送システムが構成した。 L_1 および L_2 を $5\text{ }\mu\text{H}$ 、 C_1 および C_2 を 7 pF 、 C_m を 0.8 pF としたときの伝送効率特性をSPICE系の回路シミュレータにより求めた。なおこれらのパラメータの数値は実測データを基に算出している。

結果を図3、4に示すとおり、この構成で伝送効率85%以上を確保できることが判明した。

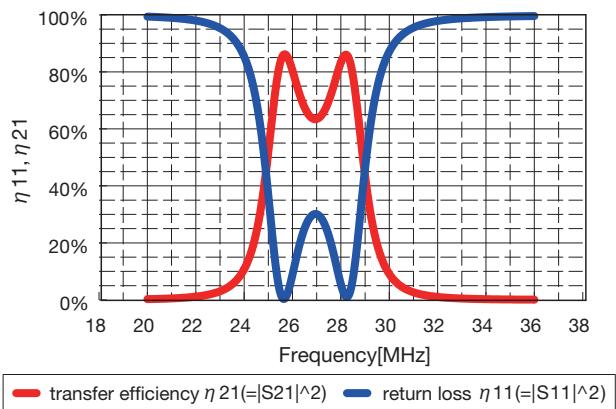


図3 伝送距離 120 mm
Power trance distance of 120 mm.

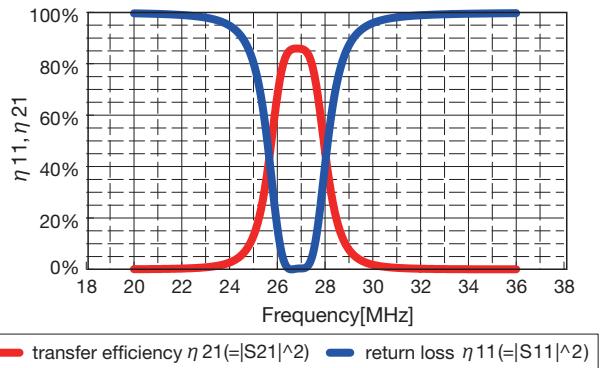


図4 伝送距離 170 mm
Power trance distance of 170 mm.

2.3 ワイヤレス給電カプラの構造検討

ミアンダライン型の電界共振結合ワイヤレス給電システムの検討が行われている³⁾。この方式では13.56 MHzや27.12 MHzという波長では線路長が長くなり、この部分での損失が生じてしまうと考えられる。

この損失を改善するため、我々は平板電極と直列共振コイルを用いて図5に示すような構造を単純化したワイヤレス給電カプラを検討した。カプラ部のパラメータは回路シミュレータで用いた値になるように設計を行なった。

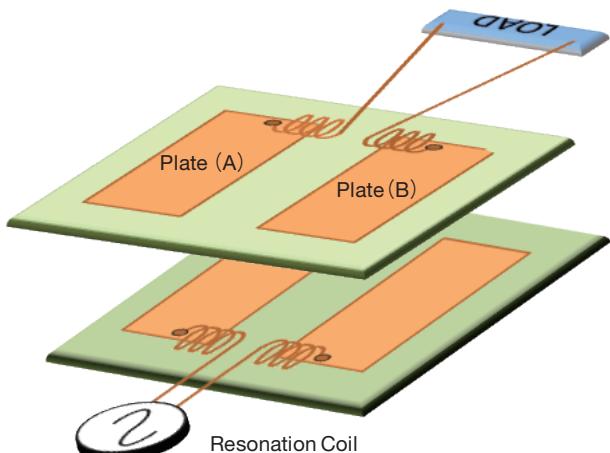


図5 カプラ構造図
The electric coupling power system.

検討した給電カプラでは薄くて軽い構成が可能となるとともに、構造が単純なため製作が容易であり、特に導体電極を形成し薄い樹脂素材で挟んだ構造では、折り曲げても使用可能である。開発したカプラを図6に示す。

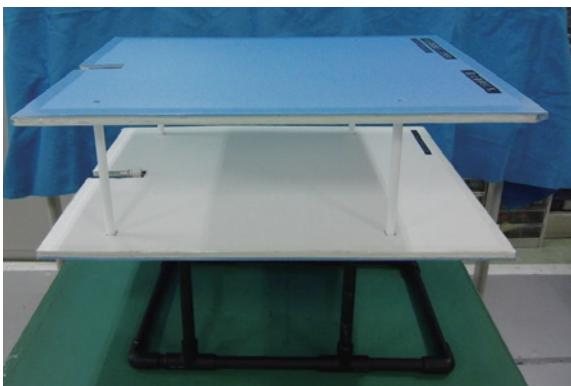


図6 電界共振結合カプラ
Electric coupler.

次に検討したワイヤレス給電カプラの動作を電磁界シミュレーションによって確認した。用いた電磁界シミュレータはモーメント法ベースで有限要素法的な解析もできるFARAD社製FEKOである。このシミュレータは誘電体の誘電率や磁性体の透磁率も入力した状態でシミュレーションできるものである。シミュレーション結果を図7に示す。

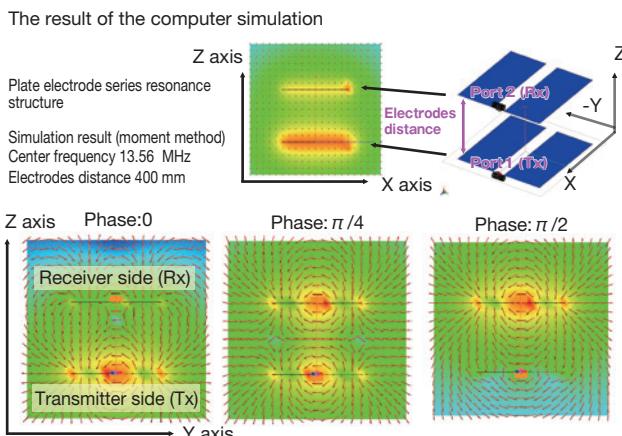


図7 シミュレーション結果
Result of the computer simulation.

図7より送受電電極間で電界によってエネルギーが伝送できていることが判る。

次に磁界共振結合方式との位置ずれに伴う給電効率の変化比較を行った。磁界のコイルと電界の電極面積を同一として比較を行った。シミュレーション結果を図8に示す。図に示すように電界型は電界の向きによっては磁界型よりも広い指向性を持つことが判る。

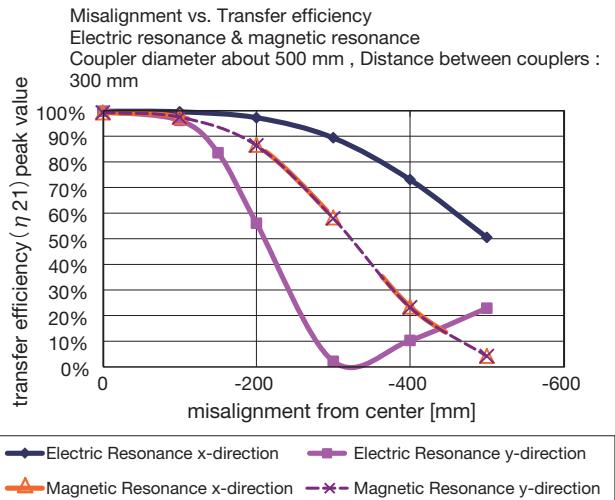


図8 カプラの位置ズレと伝送効率
Relation between the feeding power efficiency and the amount of departure from coupler.

3. 給電システムの試作

3.1 カプラ間給電効率

電磁界シミュレーションで得られた結果を基にワイヤレス給電カプラを試作した。

カプラの電極サイズは110 mm × 480 mmとし、この2枚の電極を35 mmの間隔をあけてFR4基板上に配置した。更に13.56 MHzおよび27.12 MHzにて共振するようにコイルのインダクタンスを調整し、直列に2個のコイルを接続した。受電側および送電側は同一の構造とした。カプラの入力インピーダンスは50 Ωで整合が取れるようにしてある。

このカプラの送電と受電間の距離を変化させて給電効率を測定した。測定にはネットワークアナライザを用いS21から給電効率を算出した。測定結果を図9に示す。距離200 mmにおいて伝送効率90%を達成している。

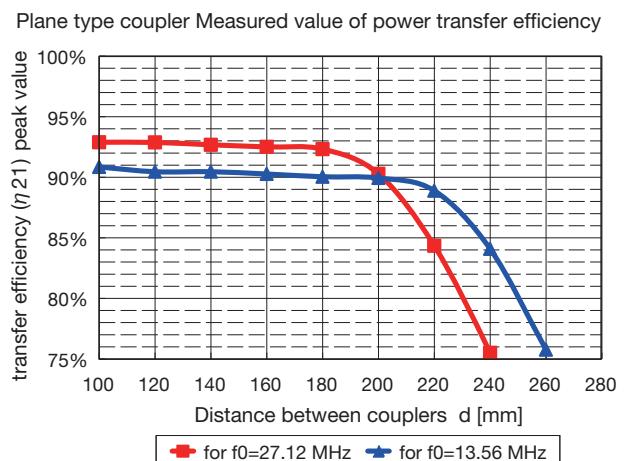


図9 伝送効率測定値
Relation between the feeding power efficiency and transmission distance.

3.2 RFインバータ回路

カプラを駆動する高周波電源は横型SiMOSFETをハーフブリッジ構成にて動作させている。この周波数帯におけるSiMOSFETの特徴として入力容量が1400 pFと非常に大きいためGateを駆動する回路は工夫が必要となる。試作した回路では、水晶発振子とインバータ素子で構成された発振回路の信号をE級増幅回路によって1次増幅を行い、その信号を電圧-電流変換することによって横型SiMOSFETを駆動している。またこの素子の出力インピーダンスは $24-j6.8\Omega$ なので、トランジスを用いて 50Ω にインピーダンス変換している。

この素子の駆動はノウハウが満載されたものであり、高周波回路技術と電力回路技術が融合された領域である。また高価ではあるが、Gateドライバを内蔵した駆動モジュール用いるとより回路構成が簡略化できる。

回路はソフトスイッチング技術を用いて高効率に高周波電力を発生させている。しかしソフトスイッチング技術の問題点として給電電力を変化させる場合には、FETのドレインとソース間に印加する電圧を変化させなければいけない。このため電源部には可変電圧源を装備している。出力インピーダンスはカプラとの整合を保つために 50Ω としている。RFインバータのブロック図を図10に示す。

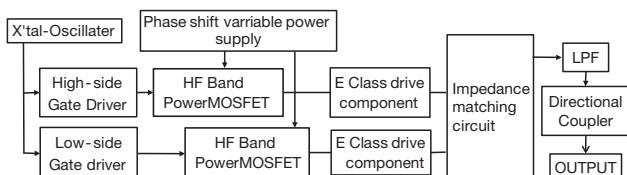


図10 RFインバータブロック図
RF power supply system block diagram.

GaNHFET素子は入力段がショットキ構造を有するために、SiMOSFETに比較して入力容量が小さい。このため現状ではSiMOSFETを駆動する回路での損失が低減できる。今後この周波数帯におけるGaNHFETなどの大電力素子が登場することを期待する。

3.3 整合器

RFインバータ出力と送電カプラ間および受電カプラと整流回路間に整合回路を設けた。これは反射による特性変化を防ぐこととRFインバータに大きな反射波が戻り回路が損傷することを防ぐためである。コイルと可変容量素子によるL型回路である。構成図を図11に示す。

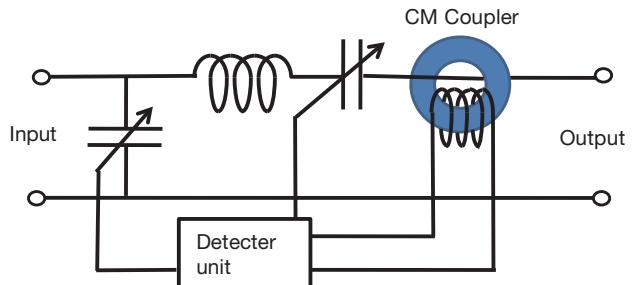


図11 整合回路ブロック図
Impedance matching network circuit.

3.4 整流部

パワーエレクトロニクスにおいて必要な電力は商用周波数50/60 Hzから直流に変換されて、制御回路であるチョッパ回路に受け渡される。ワイヤレス給電においても、HF帯(13.56 MHzおよび27.12 MHz)の搬送波電力を直流に変換する回路が必要となる。この時周波数が大きく異なる電力を整流しなければならないため、インピーダンスの整合が重要な課題となる。

一例として 50Ω の給電線路系に300 Wの電力を印加してワイヤレス給電を行うことを考えてみると、オームの法則より電圧122 V、電流2.45 Aとなる。整流回路をインピーダンスの異なる給電線路に接続すると反射波が発生するため整合回路を接続しなければならない。一方、ダイオードとコンデンサを組み合せた半波整流回路の入力インピーダンスを実測すると周波数13.56 MHzにおいて、 $Z = 1.9-j14.5\Omega$ であった。先ほどと同様に300 W入力時に整合回路と整流回路の損失が無いと仮定するとコンデンサの両端に発生する電圧とダイオードに流れる電流は66.2 V、4.53 Aとなる。つまり整流回路によって非常に低インピーダンス化されていることが判る。

PN接合ダイオードによる整流を行うと逆回復時間と呼ばれる特性によって損失が生じる。この影響は13.56 MHzや27.12 MHzでは顕著になる。このためPN接合を用いないショットキーバリアダイオード(SBD)が用いられる。

しかしながらシリコンを主体とするSBDは最高耐圧が200 Vと低いため、SiCやGaNを用いたダイオードが有効である。特にkWオーダーの電力伝送を考えた場合、整流後の電圧レベルが高く、素子の高耐圧性が要求されるので、SiCやGaNを用いるメリットは大きい。今後これらのデバイスが容易に入手できるようになることを期待する。

4. 給電システムの特性

4.1 給電電力量

開発したシステムを用いて図12に示す実験系で電力給電量の測定を行なった。実験は電波暗室内で行なった。電極間距離200 mmにおいて、送電電力量300 Wを達成することができた。

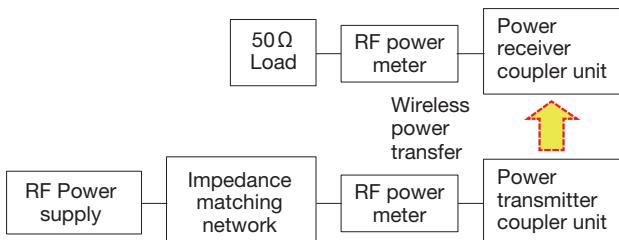


図12 測定系ブロックダイアグラム

The measurement of system block diagram.

4.2 EMC 雑音

現状の装置の特性を確認するため、図13に示す測定系でRF電源からの電源端子伝導性雑音を評価した。擬似電源回路網として協立電子工業製KNF-244Fを用いた。測定結果を図14に示す。高周波装置の電磁妨害などに関する規格であるCISPR11⁵⁾の基準をクリアしていることが分かる。

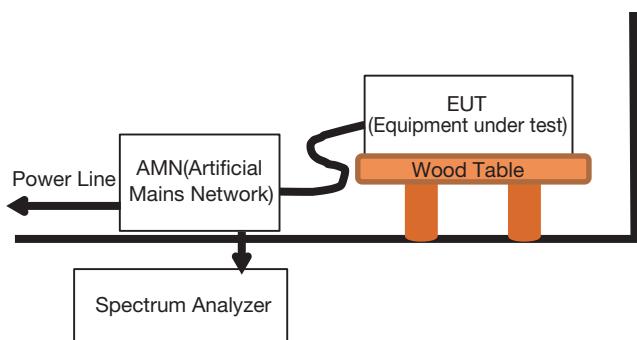


図13 CISPR11 評価系

The measurement of system block diagram of CISPR11.

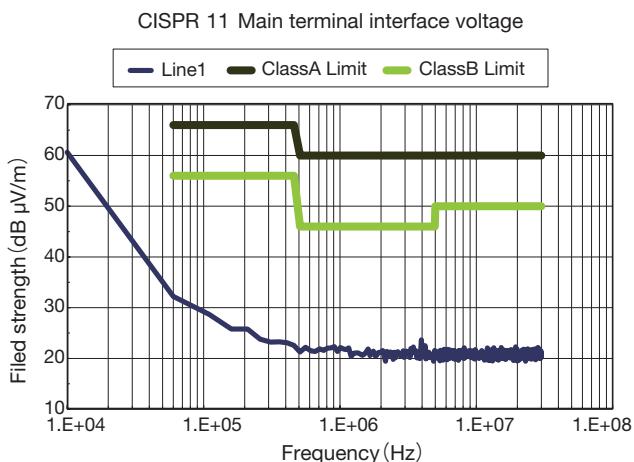
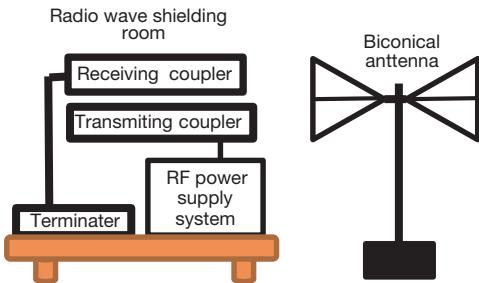


図14 RF インバータ CISPR11測定結果

Relation between the feeding conduction power line noise and frequency.

次に図15に示す測定系でEMC雑音を評価し、結果を図16に示す。電力搬送波の高調波成分は見られない。

図15 CISPR22⁶⁾ EMC 特性評価系

The measurement of system block diagram of CISPR22.

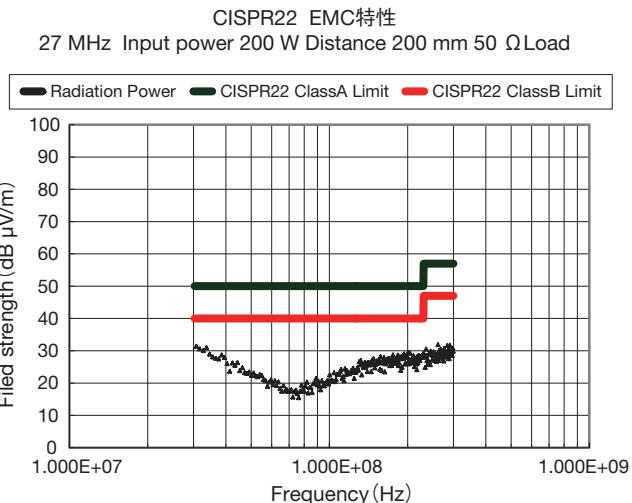


図16 CISPR22 EMC 特性

Relation between the feeding EMC power and frequency.

5. おわりに

電界共振結合を用いて、薄く軽いワイヤレス電力給電システムが構成できることを示した。

更にこのシステムを製作しその効率を測定し、送電および受電間の効率が距離200 mmにおいて90%以上であることを示した。また300 Wの給電電力量を確認した。

今後は更なる大きな電力を送受電できるワイヤレス電力給電システムへの検討を行う予定である。

参考文献

- 1) André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher and Marin Soljacic: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science Express, Vol. 317, No. 5834 (2007), 83-86.
- 2) Aristeidis Karalis, J.D. Joannopoulos and Marin Soljacic: "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer" Annals of Physics, Vol. 323, January Special Issue (2008), 34-48.
- 3) 居村 岳広:「等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究—共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送—」電気学会論文誌D, Vol. 130, No. 1 (2010), 84-92
- 4) 松木秀敏, 高橋俊英:「ワイヤレス給電技術がわかる本」,(株)オーム社, (2011), 24.
- 5) CISPR11, 国際無線障害特別委員会規格書
- 6) CISPR22, 同上規格書