

電界結合・共振型ワイヤレス電力伝送技術 — 並列共振型電力伝送回路 —

原川 健一 影山 健二 鶴田 壮広 三浦 一幸

株式会社竹中工務店技術研究所 〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1

E-mail: harakawa.kenichi@takenaka.co.jp

あらまし 本論は、電界結合および並列共振回路を用いたワイヤレス電力伝送技術についての報告である。
キーワード 電界結合法, 並列共鳴, ワイヤレス, 電力供給

Electrically Coupled Resonant Type Wireless Power Transmission Technologies — Parallel resonant power transmission circuit —

Kenichi HARAKAWA Kenji KAGEYAMA Takehiro TSURUTA and Kazuyuki MIURA
R&D Institute, Takenaka Corporation 1-5-1 Ohtsuka, Inzai-shi, Chiba, 270-1395 Japan

E-mail: harakawa.kenichi@takenaka.co.jp

Abstract: This report was described about a wireless power transmission technology using electrically coupled method and parallel resonant circuit.

Keyword Electrically Coupled Method, Parallel Resonance, Wireless, Power Transmission

1. まえがき

家庭及びオフィスにおける机上を見ると、パソコン、携帯電話、ボイスレコーダー、デジタルカメラ、HDD、照明器具、プリンタ等の電子機器が置かれ、AC ケーブル、アダプタ、USB ケーブルを介して電力が供給されている。一方、これらの機器は LAN ケーブル、USB ケーブル等を介してデータ転送も行っている。

この結果、図 1 に見られるように、コンセントやテーブルタップに各種のアダプタが取り付けられ、電源ケーブル、USB ケーブル等がスパゲティ状に絡み合った状態が出現する。

このような状態は、美的に好ましくないだけでなく、ほこりが付着しても掃除が困難になり、機器を移動する場合にはケーブルを解くことから始めなければならない。ここには、ICT のスマートなイメージとはほど遠い現実がある。

このような状況を解決する一つの方法として、任意の位置においてワイヤレス(非接触)で電力が供給できる技術の登場が望まれている。

我々は、このような目的でワイヤレス電力伝送技術を開発してきた。最初は、電磁誘導型電力伝送装置、接触式電力供給装置を検討してきた。さらに、遠隔加

熱方式としてマイクロ波方式についても検討してきた。これらの開発を通して、最終的に電界結合方式電力伝送技術を検討するに至った。

本報告では、新たに考案した電界結合並列共振型電力伝送回路に基づいて装置を実際に製作し、その諸特性を測定したので報告する。



図 1 机上に氾濫するアダプタ、ケーブル

2. 電界結合方式のワイヤレス電力伝送回路

電界結合方式の伝送回路方式には、並列共振型の他に、直列共振型、アクティブキャパシタンス型がある。本報告では、並列共振方式を直列共振方式と比較して説明する。なお、両方式に共通の事項としては、水平面内に置かれた絶縁層を挟んで、下側および上側に電極を置いて、接合容量(C)を構成する点である。絶縁層の下側を送電部、上側を受電部としている。送電部側の電極を送電電極、受電部側の電極を受電電極と呼んでいる。

2.1. 直列共振型回路

図 2(a)に直列共振型回路を示す。直列共振回路は、接合容量に直列にインダクタンス(L)を接続し、共振条件を満たすことによって、接合部のインピーダンスを極めて小さくして送電する方式である。我々は、本方式を用いて 90W の電力を 90% の効率で伝送できることを報告しているが、以下の問題が存在する。[1]

受電部と送電部間の接合容量は、接触状態によって変化してしまう。共振条件を維持するためには、発信周波数(f)またはインダクタンス(L)を調整しなければならない。周波数を調整する方式を採用するならば、占有帯域幅の増大につながる。

さらに、共振回路の Q に応じて接合容量及びインダクタンスに高い電圧が印加される。

2.2. 並列共振型回路

並列共振型回路を図 2(b)に示す。この回路は、MIT グループの磁界共鳴方式の回路[2]と基本的には同じであるが、並列共振回路①と②の結合が磁界ではなく、電界を媒体としている点が異なる。

この回路の特徴は、接合容量が共振回路の一部となっていないため、C1 や C2 に比して接合容量(C)が小さい場合には、接合容量が変化しても共振回路の周波数に与える影響は小さいことである。さらに、共振回路②が共振している時には、その両端のインピーダンスが極めて高くなるため、接合容量が変化しても共振回路①の出力電圧は、共振回路②に印加されることになり、接合容量の変化に対してロバスト性を有する。

3. 電界結合方式の電極構成

電界結合方式の電極構成としては、図 3 に示すような方式がある。図 3(a)は、MIT グループが提唱している方法[3]であり、ミッドレンジにおいて非接触に電力供給する方式である。コンデンサの電極から放射される外部電界を利用して空間に電界を作る。このため、アンテナと同じように、強い電磁波放射が予想される。

図 3(b)は、TMMS が提唱し、村田製作所が実際に製

作している方式[4]であり、電極を縦方向に配置しているのが特徴である。中央に存在する電極は小さく、電極間距離も狭いが、その上下に配置される電極は、電極面積および電極間距離が大きいため、変位電流が流れ、電磁波放射が予想される。

図 3(c)は、本稿で用いた電極構造である。本方式は、接合容量を構成する電極の間隔を狭くできるため、接合容量をダイポールと考えたときの放射電磁波は小さい。さらに、一つのダイポールの隣には逆極性のダイポールが存在するため、二つのダイポールから放射される電磁波は打消し合うことになり、電磁波放射がさらに抑制される。

この方式は、二電極構造のみでなく、隣接する電極の極性が異なるように、多電極化することも可能である。この場合には、さらに電磁波放射が抑制できる。

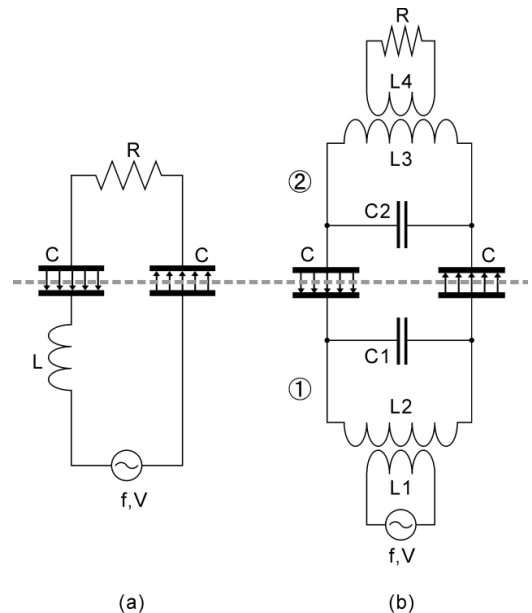


図 2 電界結合方式の伝送回路図

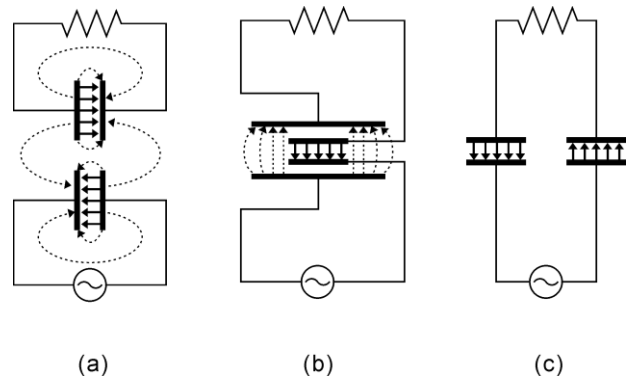


図 3 電極構造の比較

4. 並列共振型電力伝送装置

4.1. シャーシ部

図 2(b)の並列共振型伝送回路、図 3(c)の電極構成を採用して製作した装置の外観図を図 4 に示す。

本装置は、下側が送電部、上側が受電部であり、受電部にはダミーロードを付けている。送電部と受電部の間には、並置した接合容量が 2 つある。

本装置は、各種試験を行うために、大きめに製作したものであり、電界結合電力送電そのものが大掛かりな装置を必要とする訳ではない。装置の大きさは、縦・横・高さ(キャストを含む)がそれぞれ約 1m の大きさとなっている。図 4 では、受電部は、接合容量の上に乗っているだけであるが、実際の装置には、受電部をサポートする機構が付けられている。回路説明の都合により省いてある。

4.2. インバータ

図 5 は、インバータ部を示している。出力周波数が、0.6MHz、1.2MHz、2.0MHz のインバータを併設しており、コネクタを切り替えて使用する。インバータ回路は、インフィニオン製 Si MOSFET を搭載したハーフブリッジ型であり、それぞれの最大出力は 300W、89%~98% の直流入力に対する高周波出力変換効率を有している。図 5 のインバータは送電部内に収容されている。

4.3. 伝送回路

図 6 は、図 2(b)における①の並列共振回路及びトランスまで含めた伝送回路を 3 周波数分まとめたものである。送電部では、インバータの出力を共振回路部に接続し、共振回路部からの出力は、送電電極に接続している。

受電部にも、同じ回路が収納されており(図 2(b)の②に対応)、受電電極からの出力が本伝送回路に入力され、伝送回路からの出力はダミーロードに接続されている。

4.4. 接合容量

接合容量を構成するための受電電極と送電電極の外観を図 7 に示す。図 7(a)には受電電極を、図 7(b)には送電電極を示している。

送電電極には、比誘電率 4500、 $\tan \delta$ 0.01 のチタン酸バリウムバルク材(100mm×100mm×1mm)を使用した。チタン酸バリウムバルク材は、裏面にアルミニウムを全面蒸着した後に、銀ペーストにてステンレス電極板に密着させたものを使用している。さらに、端部の空隙部分にエポキシ樹脂を充填しており、加圧時のチタン酸バリウムバルク材の割れを防止している。

送電電極はチタン酸バリウムバルク材という剛体であるため、研磨された金属製の電極を対向させても、

点接触しかせず、微小の空隙がほとんどの面積を占める。このために、接合容量が大きくなる。これを改善するために、受電電極として導電性ソフト電極を用いている。ソフト電極は、硬度 5 度のミラブルシリ

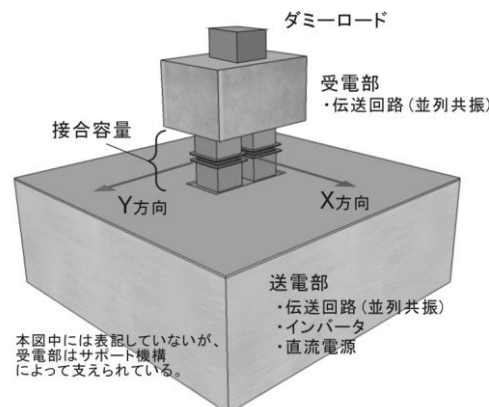


図 4 装置外観図



図 5 インバータ(右より 0.6MHz, 1.2MHz, 2MHz)

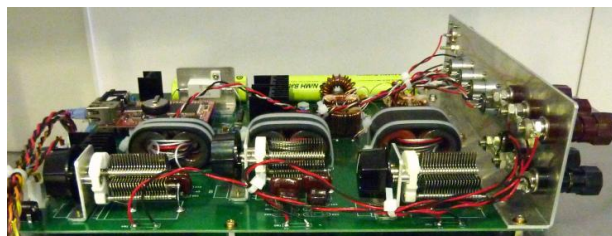


図 6 伝送回路(右より 0.6MHz, 1.2MHz, 2MHz)

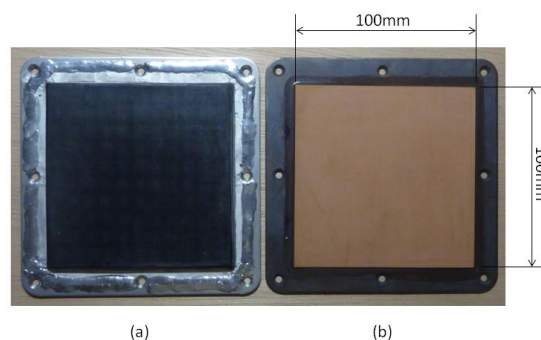


図 7 接合容量の電極の外観図
(a): 導電性ソフト電極、(b):強誘電体電極

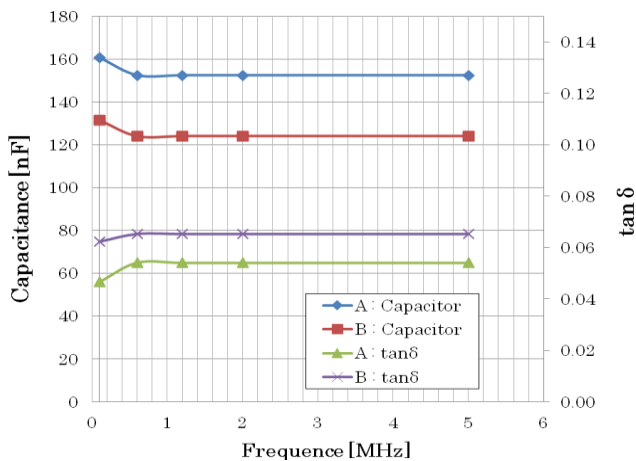


図 8 接合容量、tan δ の周波数依存性

コンの裏面を除く五面をステンレスメッシュでカバーし、四周を電極板にはんだ付けたものである。さらに、ステンレスメッシュ材には、カーボン含有の導電性ゴム材を絡ませてある。この方法で、導電性とソフト性を両立させた電極を製作した。

図 8 は、製作した二つの接合容量(A,B) (導電性ソフト電極と強誘電体電極を対向させて構成)の容量と tan δ の測定結果である(接触圧力は、約 40g/cm²)。接合容量および tan δ とともに周波数依存性が観測されているが、0.6MHz 以上でほぼ定常値になっている。この時の容量は、A:152nF, B:124nF となっており、チタン酸バリウムを完全密着金属で挟んだ理想的容量(398[nF])の約 31~34%が実現できた。金属平板電極をソフト電極の代わりに用いた場合には、容量は理論値の 1/10 以下になってしまうため、改善されていることが判る。tan δ は、A:0.054、B:0.065 となっており、チタン酸バリウムバルク材単体の tan δ (0.01)より大きく、容量の大きいものが低い tan δ になっている。

今回製作した装置は、600kHz、1.2MHz、2.0MHz で動作させるため、安定域の値を使用することができた。

5. システム性能

5.1. 伝送路特性

並列共振型回路から、電源およびダミーロードを取り去り、2 つの共振回路及び接合容量を含む伝送回路の S21 特性をネットワークアナライザ(Agilent E5061A)を用いて測定した。

伝送回路は、各周波数に合わせて共振回路を選択して構成した。各回路の S21 特性は、表 1 のようになった。代表例として、2.0MHz におけるネットワークアナライザの測定例を図 9 に示す。図 9 は、1MHz~3MHz 間でスイープさせた時の S21 特性を示しており、2.0MHz の伝送回路の共振周波数が 2.0MHz に調整できており、

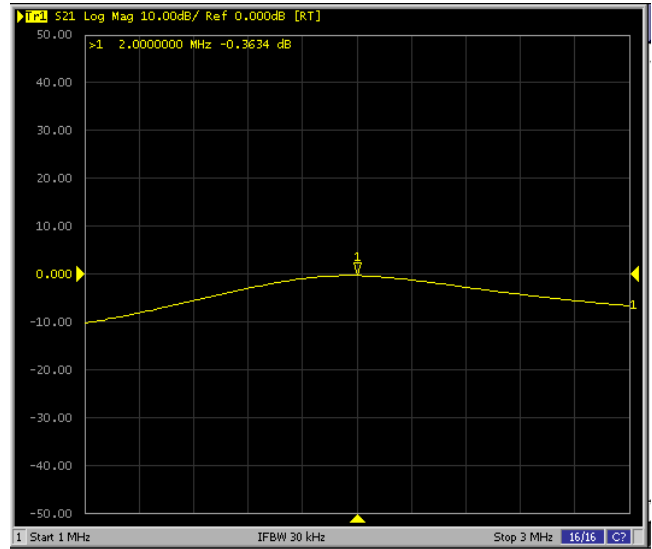


図 9 2.0MHz の伝送回路の S21 特性

表 1 伝送回路の減衰特性

周波数	S21(減衰特性)
0.6MHz	0.43dB
1.2MHz	0.38dB
2.0MHz	0.36dB

表 2 並列共振回路の伝送電力と効率

		出力設定値[W]			
		10	50	100	200
0.6 MHz	インバータ出力[W]	10	50	100	200
	受電電力[W]	9	49	78	150
	伝送効率[%]	90	98	78	75
1.2 MHz	インバータ出力[W]	10	50	100	200
	受電電力[W]	8	35	68	170
	伝送効率[%]	80	70	68	85
2.0 MHz	インバータ出力[W]	10	50	100	200
	受電電力[W]	9	41	85	171
	伝送効率[%]	90	82	85	86

伝送ロスが-0.36dB と小さな値を示していることが判る。他の周波数における特性も、同様な特性を示した。

5.2. 伝送電力量・伝送効率

送電電力はインバータ出力、受電電力はダミーロードへの出力を測定して求め、伝送効率は、インバータ出力部とダミーロード入力部の電力を比較することで求めた。測定方法は、測定点における電圧をオシロスコープで測定し、電流をカレントプローブで求めて電力を計算する方法と透過型電力計(Bird 4410A)を用い

て、測定点における透過電力および反射電力を求める方法を比較した。両測定法では、概ね同一の結果が得られたため、以下の結果では透過型電力計を用いた結果のみを示す。

表 2 には、透過型電力計で求めた各周波数毎のインバータ出力、ダミーロード入力(受電電力)および伝送効率を示している。同表が示すように、伝送電力はすべての周波数で 150~170W が達成できた。

伝送効率は、0.6MHz で伝送電力が 50W のときに 98% の効率が得られているが、出力を大きくすると 75% まで効率が落ちている。1.2MHz では、200W で 85% の効率が得られているが、100W では 68% まで落ちている。2.0MHz では、最大の効率は 10W のときに 90% になっている。100W、200W でも、85% の伝送効率が得られている。回路構成素子は温度特性を有するため、一つの電力値でチューニングした場合には、他の電力値でチューニングがずれ、伝送効率が低下する。このため、

使用電力が判っている場合には、その電力値でチューニングすれば、高い伝送効率が得られる。

6. 放射電磁界強度

6.1. 放射電界強度

図 10 は、2.0MHz にて 50W の電力送電を行った時の放射電界強度の距離減衰特性を示している。測定値、ICNIRP ガイドライン、電波防護指針の指針値を示している。横軸は、電極端から 0.12m 離れた位置を始点とした距離を示している。電極からの距離に対して計測値は約 3 乗で減衰しており、静電界であることが判る。電極近傍での電界強度は、ICNIRP のガイドラインを下回っている。図 10 の凡例に示してある X 方向、Y 方向は、二つの接合容量の中間点を通る平面上の二軸(図 4 参照)を示している。

また、0.6MHz、1.2MHz における計測値は、2.0MHz の電界強度の距離減衰と、ほぼ同様な値を示した。

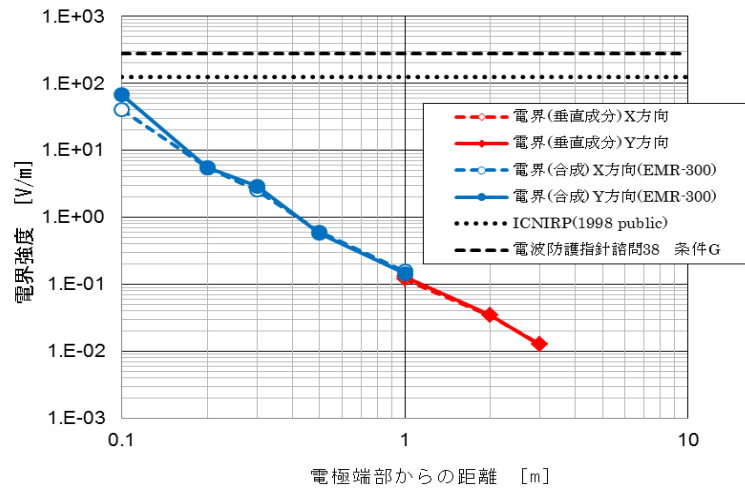


図 10 2.0MHz、50W 電力送電時の放射電界強度

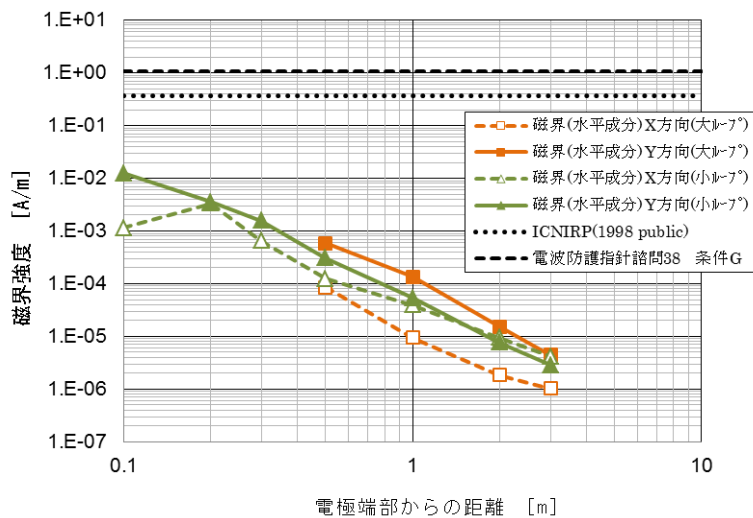


図 11 2.0MHz、50W 電力送電時の放射磁界強度

6.2. 放射磁界強度

図 11 は、2.0MHz で 50W の電力を送電したときの磁界強度の距離減衰特性を示している。測定値は、約 2 乗減衰に近い特性を示し、誘導界であることが判る。また、電極近傍においても ICNIRP のガイドラインよりも一桁以上低い値を示している。

放射磁界強度も、0.6MHz、1.2MHz においては、2.0MHz の場合とほぼ同様な距離減衰特性を示した。

7. 接触状況に対するロバスト性

電極面の接触状況により、伝送効率が左右されることを防止する方法としてソフト電極による方法を説明したが、異なるアプローチとして、回路的な方法がある。

並列共振回路には、小結合係数(小接合容量)でも送電可能な特性がある。本特性を確認するため、電力伝送時に接合容量を隔離させ、伝送電力の変化を観測した。その結果を図 12 に示した。受電部を固定しているボルト(ピッチ 1.2mm)を回転して電極を徐々にリフトアップさせた。電極にソフト電極を用いているため、ボルトを回転させても、受電部の重さで圧縮されているソフト電極が復元するため、2mm まで変化していない。それ以上離してゆくと、伝送電力がわずかに増大した後、急激に落ちている。4.1mm 離隔した点では 95W 受電していた電力が 50W まで低減し、それ以上離隔すると伝送できなくなった。

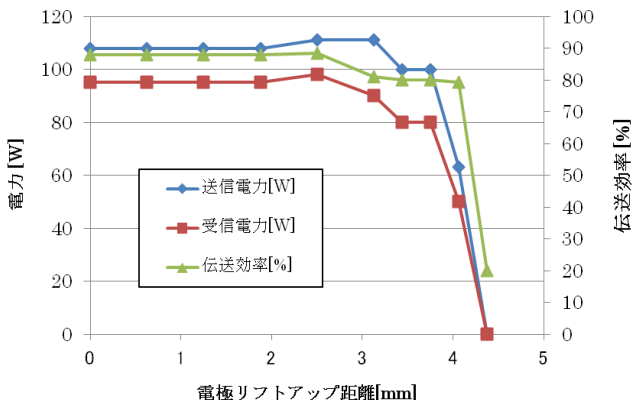


図 12 電極リフトアップ時の伝送電力・伝送効率



図 13 4.1mm リフトアップさせた時の電極

4.1mm リフトアップさせたときの電極部の写真を図 13 に示す。受電側の電極固定部には、電極の不平行度を吸収するために、ソフト支持材を使用している。このため、受電部を平行にリフトアップさせても、電極は斜めになり、一部が接触した状態になっている。写真に示した状態では、接合容量は 10~100pF オーダーに低下している。この様な状態でも、送電が途絶する直前まで電力伝送できており、接触状態の変化に対するロバスト性が確認できた。

8. まとめ

電界結合の共振型非接触電力供給技術として並列共振回路による電力伝送システムを実際に製作し、計測した。インバータ、伝送回路および接合容量等を製作して組み合わせることにより、電界結合方式による並列共振回路で高効率電力送電できることが判った。

伝送電力が 150W を達成でき、伝送効率も部分的には 95% 以上を達成できた。さらに、放射電界強度および放射磁界強度が低いことが確認できた。

電極をリフトアップしたときの送電実験からは、ロバスト性を確認できた。

今後は、並列共振技術を用いたフリーポジション性のある電力供給技術の検討を進めてゆきたい。さらに、発信周波数を高めた検討も進めたい。

謝辞 本実験をまとめるに当たり、多大なご指導を頂いた総務省電波政策課の皆様には深謝いたします。さらに、装置の製作に精力的に対応していただいたパワーアシスト・テクノロジー(株)の皆様には深謝いたします。

本研究は、総務省の技術的試験事務予算によって遂行されたものであります。

文 献

- [1] 原川健一, 影山健二, 三浦一幸, "電界結合技術によるワイヤレス電力伝送技術の可能性", 竹中技術報告, No.66, pp.11-18, 2010.
- [2] Aristeidis Karalis, John D. Joannopoulos, and Marin Soljacic., "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annals of Physics* Vol.323, 34, (2008).
- [3] André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher and Marin Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", *Science Express*, 317(5834), pp.83-86(2007).
- [4] 家木英治, 郷間真治, "電界結合のワイヤレス給電 薄い電極で携帯機器に対応", 日経エレクトロニクス, 7-25, pp.87-94, 2011.