

WPT ガイドの応用 — 小型軽量なリピータによる隔壁給電 —

栗井 郁雄[†] 澤原 裕一[‡] 生田 祐也[‡] 張 陽軍[‡] 石崎 俊雄[‡]

[†] 株式会社リユテック 〒520-2194 大津市瀬田大江町横谷 1-5

[‡] 龍谷大学理工学部 〒520-2194 大津市瀬田大江町横谷 1-5

E-mail: [†] awai@ryutech.com, [‡] {zhang, ishizaki}@rins.ryukoku.ac.jp

あらまし 金属パイプやロッド、さらには円板をワイヤで結んだ構造物を結合共振器型 WPT システムの共振器間に挿入すると大幅な伝送距離延長が実現できることを見出し、それを WPT ガイドと名付けた。この構造は設計が単純で軽量に作製できることからいわゆるリピータに利用できる。さらにそれにとどまらず新しい応用法がありうると考え、今回はその 1 例として隔壁給電の可能性について紹介する。

キーワード ワイヤレス給電, ガイド, 電界結合, オープンスパイラル共振器, リピータ, 隔壁給電

Application of WPT Guides

— Wireless Power Transfer through a Wall by Small and Light-weight Repeaters —

Ikuo AWAI[†] Yuichi SAWAHARA[‡] Yuya IKUTA[‡] Yangjun ZHANG[‡] and Toshio ISHIZAKI[‡]

[†] Ryutech Corporation 1-5 Yokotani, Seta-oecho, Otsu, 520-2194 Japan

[‡] Faculty of Science & Technology, Ryukoku University 1-5 Yokotani, Seta-oecho, Otsu, 520-2194 Japan

E-mail: [†] awai@ryutech.com, [‡] {zhang, ishizaki}@rins.ryukoku.ac.jp

Abstract We have found that power transfer range is greatly extended by inserting some structures made of metal pipe, rod or disks connected with wire between two resonators of a resonator-coupled WPT system, and we have named them as WPT guides. One of them is easily designed and light-weight, and thus utilized as what they call the repeaters. In addition, more versatile applications could be devised considering its simple structures. The present report shows how it is used for power transfer through a wall, as an example.

Keyword Wireless Power Transfer, Guide, Electric Coupling, Open spiral resonator, Repeater, Transfer through Walls

1. まえがき

磁界結合共振器型（磁界共鳴型）ワイヤレス給電（WPT）システムは 2 つのコイル共振器の結合によって電力伝送を行う。伝送距離は通常コイル寸法程度からせいぜいその 2~3 倍程度でなければ効率が大幅に下がるので、それ以上は特殊用途にしか用いることが出来ない。その克服のためにはリピータと称して追加の共振器を幾つか挿入することによって伝送距離を多少延ばす努力がなされてきた[1]-[5]。

我々はスパイラル共振器による水中給電を試みる中でエバネセント界のガイド効果を見出した[6]ので、それを WPT ガイドと名付けて伝送距離の拡張に用いる他、新たな応用法を模索している。この現象は誘電体、磁性体、導体のどれをガイドとして用いても出現する。当然ながら誘電体を用いればそれはスパイラル共振器の電界成分をガイドし、磁性体を用いれば磁界成分を導くことになる。そして金属は電界/磁界の両者に関係しそうであるがその確認は本報告にて行う。

本研究では金属を用いたガイドを中心に、その新しい応用可能性について検討した。このガイドは構造が簡単で軽量であるために広い応用範囲を持ちうると考えている。しかしその原理はあまり良く分かっていないので、今回は現象を様々な側面から把握するというアプローチを取りたい。応用の可能性と原理の探索を同時並行的に進める方針である。

2. 金属ガイドの特性

結合共振器型 WPT システムでは 2 つの相対する共振器が作るエバネセント界の結合によって電力が伝送される。従ってその電磁界に対する周辺の媒質配置を変更して界分布が遠方まで伸びるように工夫すれば、共振器間結合係数が増加して伝送距離が延長されると考えて良いであろう。我々はたまたま水中給電の検討のために水を詰めたペットボトルを共振器間に配置した際に伝送距離の拡大を見出した事でこの現象に遭遇した[7]。

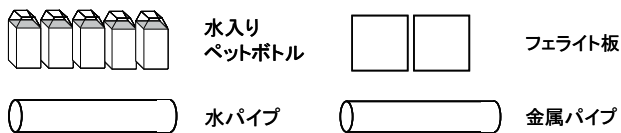


図1 様々な材料で作られた WPT ガイド

そこで図1のようなペットボトル、水パイプ、フェライト板、金属筒などを用いたガイドを作り、それぞれでガイド効果を確認することが出来た[5]。その中で特に作製が容易で効果も大きい金属ガイドを取り上げて詳しく伝送特性を調べることにする。図2のように直径30cm、巻き数は99回、共振周波数2.3MHzの円形均等巻きオープンスパイラル共振器を2つ用意し、その間に円筒状銅パイプを配置している。パイプの肉厚は0.1又は0.2mm、直径は10cmである。左右に配置した円形1回巻きループコイルはスパイラル共振器の励振用であり、インピーダンス変換用トランスの役割を果たしている。スパイラルコイル、銅パイプ、ループコイルの中心は合わせている。

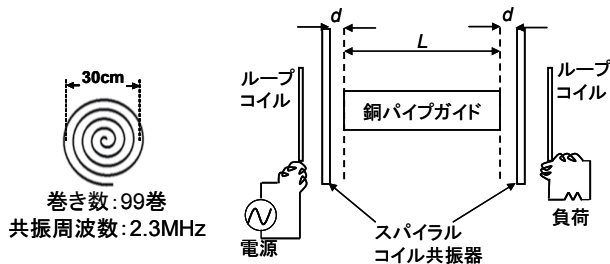


図2 銅パイプガイドの実験配置

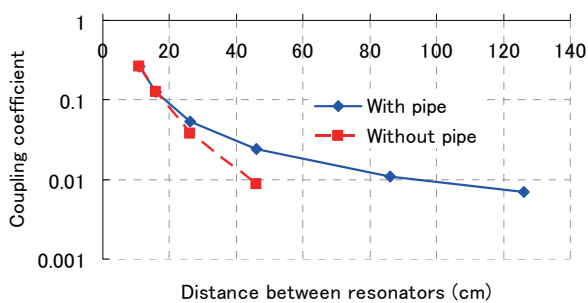


図3 結合係数の共振器間距離依存性

図3は銅パイプが存在しない場合と挿入した場合のスパイラル共振器間結合係数を共振器間距離の関数として測定したものを比較している。明らかに銅パイプの効果が特に遠方で大きく出ており、大幅な伝送距離拡大が期待できる。そこで共振器間距離90cmに対して回路整合を取り、伝送特性を測定したところ $S_{21}=-3\text{dB}$ という値が得られた。この結果によると共振

器直径の3倍の距離であっても十分高い効率で伝送可能であることが分かる。

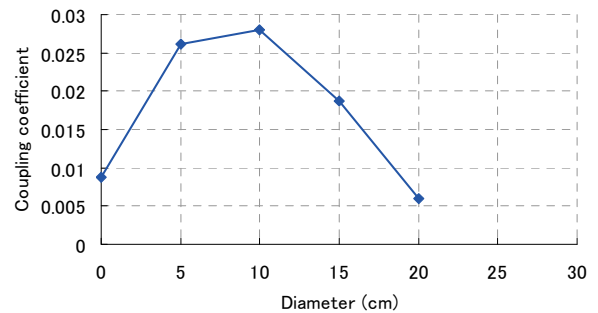


図4 結合係数のガイドパイプ直径依存性

次にガイドの原理を考察するためにパイプ直径を変更する。図4はガイド長を40cmに保って直径を変更した時の結合係数変化である。図3と図4の構造を念のため電磁界シミュレーションしてみた。シミュレーションソフトはWIPL-Dである。ただし巻き数が多いと計算負荷が大きすぎて電算機が動作しないため、スパイラルコイル直径は実験と同じだが巻き数は70に減らし、周波数は3MHzに設定した。図5と6にその結果を示したがそれぞれ図3と4によく対応していることが分かる。なお横軸の直径=0はパイプなしを意味する。

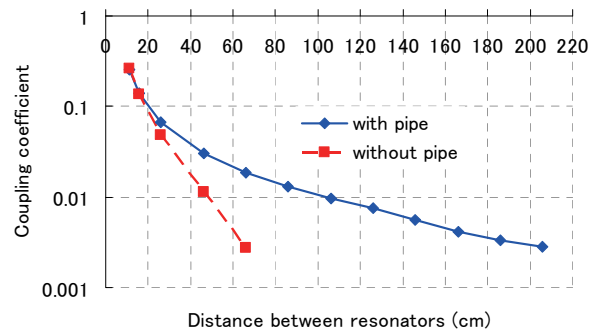


図5 結合係数の共振器間距離依存性 (シミュレーション)

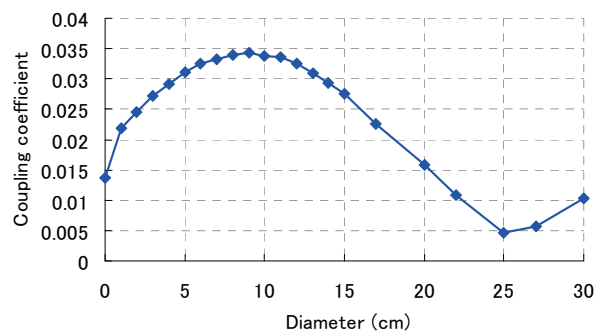


図6 結合係数のガイドパイプ直径依存性 (シミュレーション)

まず図5は図3の結果を追認するものである。明らかに金属パイプの存在が結合係数の増大に貢献していることが電磁界シミュレーションでも認められた。一方図4と6では、パイプ直径がスパイラル共振器直径の1/3くらいで最大値をとるのが特徴的で、図7に示したスパイラル共振器の電磁界分布と比較してみると興味深い。磁力線はスパイラル共振器面では全て同一方向を向いているが電気力線は半径方向の或る点からは逆転している。そのため結合係数増大は銅パイプガイドが電界結合によってエネルギーをガイドするためであることを示唆している。

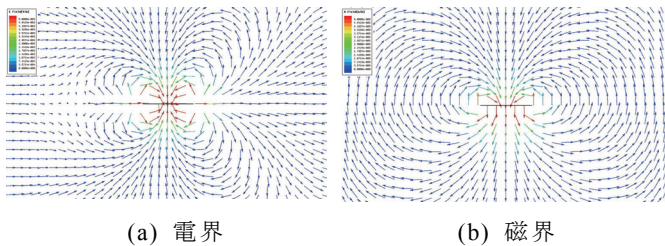


図7 スパイラル共振器の電磁界 (シミュレーション)

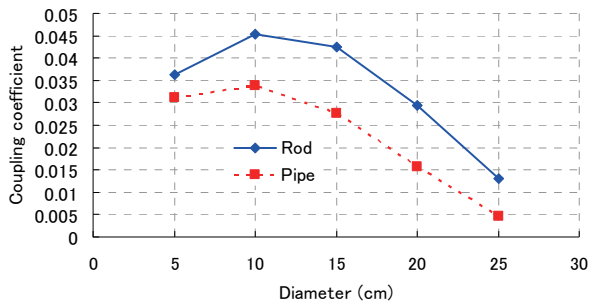


図8 結合係数に対するパイプとロッドの違い (シミュレーション)

さらに電磁界がパイプの内側か外側のどちらに存在するかを確認するためパイプの両端を導体で閉じて棒状にしたものをWIPL-Dで解析してみた。その結果は図8であり、同図に再掲した図5の結果と比較すると反って結合係数は増大していることが分かる。この結果から電磁界はパイプの内側ではなく外側に存在して2つの共振器の橋渡しをしているものと予想される。

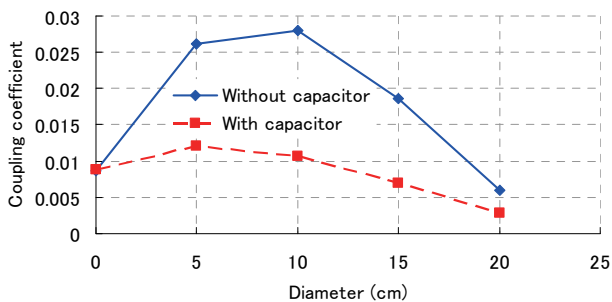


図9 外付け容量による結合係数の減少

最後に共振器を取り替えることによって電界の役割を確認しよう。図2で用いたオープンスパイラル共振器は電界がスパイラルコイル近傍に強く残っているために磁界/電界の両者によって結合している。ここで図2の共振器をコンデンサ付きのものに取り替える。この時電気エネルギーはコンデンサ中に閉じ込められコンデンサ容量の増加とともにコイル近辺に存在する電気エネルギーは限りなく少なくなっていく。その結果、ある程度以上の容量を接続すると結合は磁界だけになってしまう[8]。同じ外径で外付け容量 95pF、巻き数22回の均等巻スパイラル共振器を図2の代わりに用いた結果を図9に示す。同図には外付け容量の有無による結合係数の違いがパイプ直径の関数として示されている。この結果では図3と異なり容量付きの共振器では銅パイプが結合に役立たないか、または邪魔にさえなっている。図4の結果と合わせて考えると電界結合が結合係数増大に中心的な役割を果たしていることが明らかとなった。

3. 新しいリピータの提案

確かに金属パイプが伝送効率増大に役立つことは分かったが嵩張るので扱いにくい。さらにパイプもさることながら、多少効率が高いとはいえ金属棒はなおのこと重量まで大きく、あまり実用に向くとは思われない。そこで電界が重要な役割を果たしていることを考えて、図10のような電界を運びそうな軽くて曲げやすい構造を試みることにした。これは2枚の銅円板とそれをつなぐ銅線からなっており、今後このタイプの構造物をディスクリピータと呼ぶことにしたい。このリピータを図2のように相対する2つのオープンスパイラル共振器の前面に非接触で設置し共振器間の結合を強めようとの計画である。

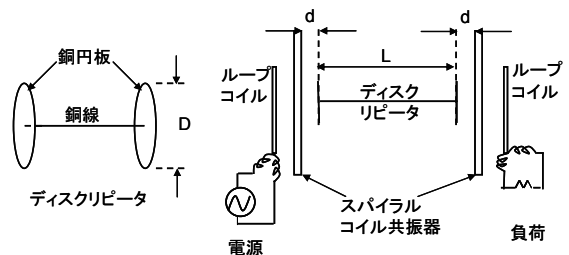


図10 提案するリピータと測定系の構造

図11にリピータ線長 L を変えた時の結合係数の変化を測定し示してある。直径 $D=10\text{cm}$ 、厚さ 0.1mm の2枚の円形銅板、直径 1mm の銅線で作ったリピータをスパイラル共振器との間隔 d が 1cm となるように挿入し、周波数は 2.3MHz とした。期待以上の大きな結合係数が得られており、特に遠距離での改善が著しいの

で、ベクトルネットワークアナライザを用いて伝送実験を行い、測定結果を図 12 に示した。例えば共振器直径の 6 倍である長さ $L=180\text{cm}$ においても S_{21} として -0.75dB という高い値が得られており、これは伝送効率 84% という値である。なお kQ 積から計算した伝送効率も示したが非常に測定値とよく合っている。

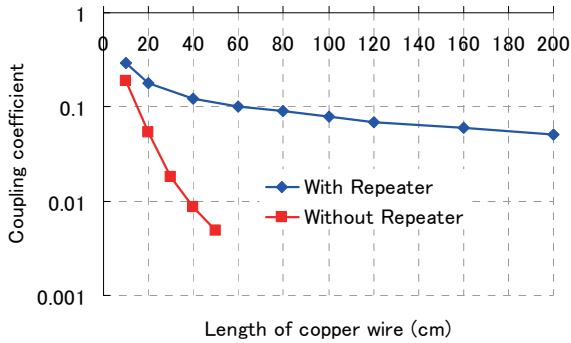


図 11 リピータ線長に対する結合係数の変化

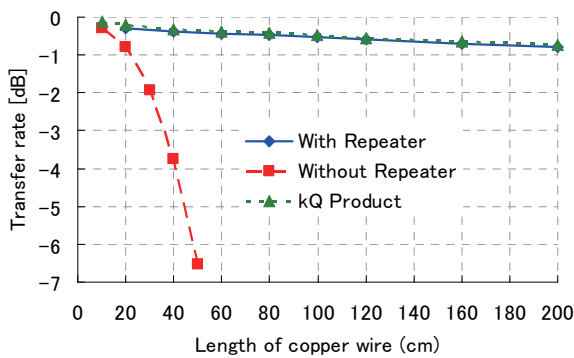


図 12 リピータ線長に対する伝送特性の変化

この構造に対し結合係数を銅円板直径の関数として図 13 に示したが、図 9 の銅円筒に対する結果と同じようにスパイラルコイル直径の 1/3 強の円板直径で最大値を示している。これによって銅板+銅線リピータも電界を運んでいることが明らかであろう。

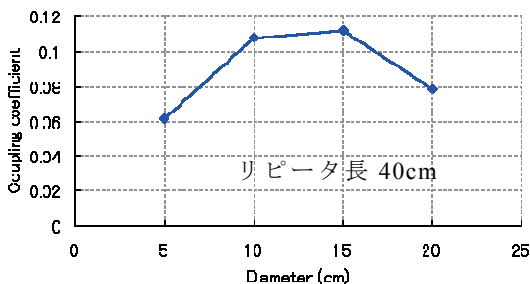


図 13 リピータ円板直径が結合係数に与える影響

このような構造物がいかなる原理に基づいてエネルギー伝送を行うのか詳しいことは現時点では不明で

あるが、暫定的に次のように考えている。スパイラルコイルの電界が相対する銅円板に電荷を誘起し、それが接続した銅線を通じて他端に達するとその銅円板に電荷を与える。その電荷が相対するスパイラルコイル共振器を励振するというものである。

上の仮説を直接証明するものではないが電磁界シミュレータ WIPL-D を用いてこの構造を解析してみた。図 5,6 の場合と同じ理由でコイル巻き数は 70 巻に減らしてあるが、結果を図 14 に示した。比較のために 2 共振器間がリピータ無しの自由空間の場合、図 5 の銅パイプを挿入した場合も合わせて示してあるが、この銅円板+銅線が最も大きな結合係数となっていて実験結果を支持している。

更に図 9 と同じように、外付け容量の有無によって電界を閉じ込めた共振器と閉じ込めていない共振器を今回はシミュレーションで比較した。図 14 のシミュレーションと合わせるために、20 巻のスパイラル共振器に 60pF の外付け容量を加えて共振周波数は 3MHz とした。結合係数を銅円板直径の関数として調べたところ図 15 の結果が得られ、外付け容量によってリピータ効果が消滅することが明示されている。

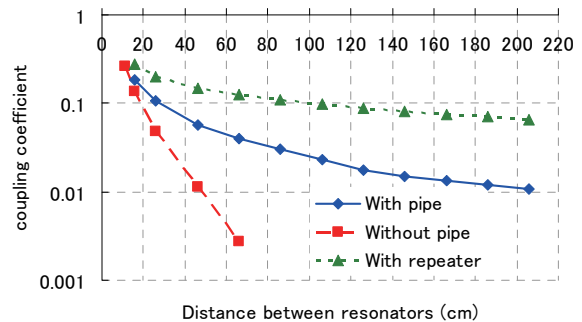


図 14 3つの構造の結合係数 (シミュレーション)

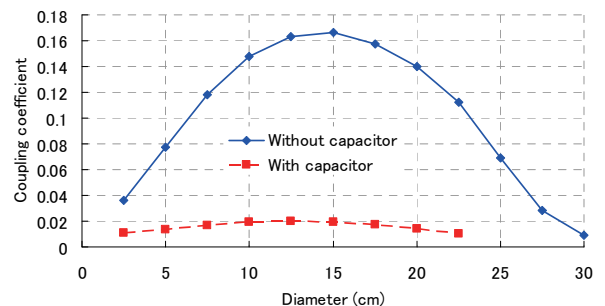


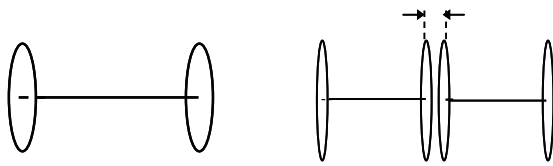
図 15 外付け容量がリピータに与える影響 (シミュレーション)

以上の検討によって、電界が重要で磁界は全く役に立っていないことが明らかになったので、通常よく用いられる外付けコンデンサを持つコイル共振器にはこのリピータは使えないことになる。即ちいわゆる“磁

界共鳴型” WPT システムが文字通り磁界だけで結合していれば、このディスクリピータは動作しない事に注意しなければならない。

4. 隔壁給電

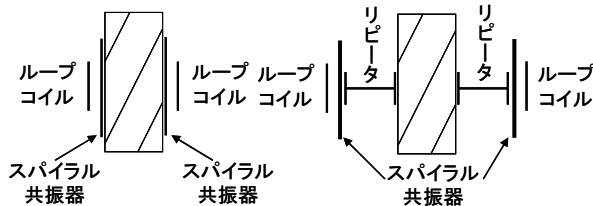
このように給電装置を非常に簡素化することが出来たので応用法を考えたい。非接触ではあるがワイヤを張っているため“有線”であるから“非接触”の方に力点をおいて考えるのが良いと思われる。そのひとつとして隔壁給電を提案したい。ガラス窓を通して室内から室外へ、1つの部屋から壁を通して隣の部屋へ、空気中から水槽中へなどの給電が簡便に出来れば有用ではないかとの提案である。



(a) 分割前 (b) 分割後

図 16 ディスクリピータの分割と隔壁の挿入

その基礎データを得るために図 16 のような構造を取り上げる。もともと(a)のように1つのリピータで2つの共振器間の給電を行っていたという想定で、次にリピータを2つに分割してその間に何らかの隔壁を設置しようというものである。図 17(a)のようにスパイラル共振器を直接壁に取り付けずに(b)のようにリピータを介する理由は、平面的であるとは言ってもスパイラル共振器はそのまま隔壁に取り付けるには寸法、重量、付属回路などが邪魔するからである。ディスクリピータは前述のように銅円板と細線だけで構成されているので取り回しが極めて良い。



(a) 簡素だが実現困難な方式 (b) 複雑だが実現容易な方式

図 17 隔壁給電の構成法

4.1. ガラスを介した給電

まず l だけ開けたギャップに何も挟まない状態の結合係数は図 18 のとおりであり、 l を大きくすると当然結合係数は低下する。次にギャップにガラスを挟んだ時の変化は図 19 のようになる。図 18 と同様に l の増大とともに結合係数は低下するが、真空に比べて高いの

はガラスが一定の誘電率 ($\epsilon_r=6\sim 8$) を持っているために コンデンサと同じ原理で真空よりもインピーダンスが低く高周波電流が流れやすいためと思われる。

興味深いのは図 19 に於いて横軸が 0 よりも有限値の方が結合係数が大きいという結果である。ギャップ=0とは2枚の銅円板が密着している場合を意味しており、リピータに沿って導電電流が流れているものと思われるが、ガラスを挟むとガラスを通して変位電流が流れ、その方が流れ易いと言う事ができるかもしれないがこの点も未確認である。

実際の給電効率を評価するためにはディスクリピータの有無による違いを示す必要がある。図 16(b)に於いて厚さが 0.6mm のガラスを挟んだ構造と、全くリピータを使わずにガラスの両側に共振器をおいた場合とを比較した。共振器間隔は 20cm~80cm まで変えた結果を図 20 に示す。ディスクリピータの効果は歴然としており、有効性が明らかである。

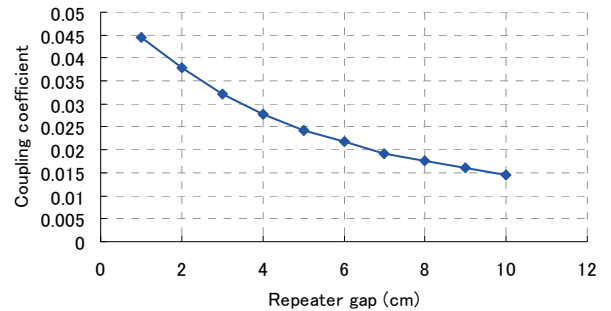


図 18 分割ディスクリピータのギャップ依存性

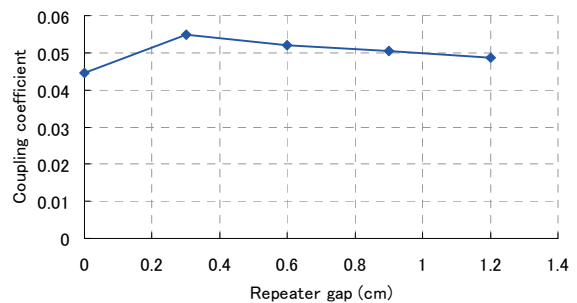


図 19 ギャップにガラスを挟んだ時の結合係数

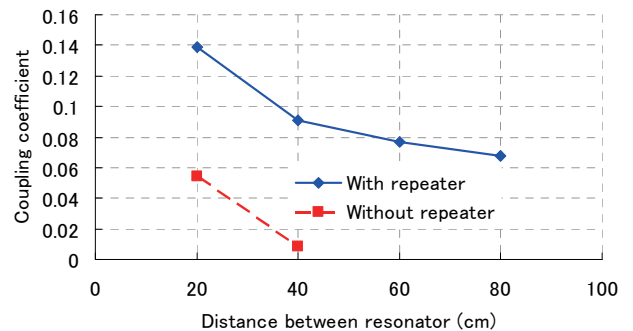


図 20 リピータの有無による結合係数の差

結合係数の高さを反映して伝送特性も優れていると期待し、リピータを用いたガラス透過給電とリピータなしの場合を比較してみたのが図 21 である。期待通りにほとんど損失なく給電が行われることが確認できた。今後はこの方式によって戸外への給電を試みたい。

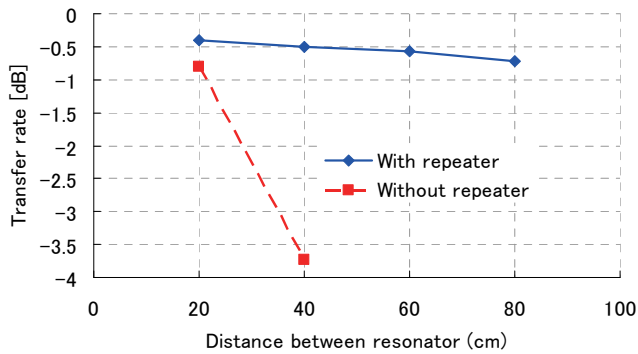


図 21 リピータの有無による伝送特性の差

4.2. 石膏ボードを介した給電

窓ガラスのように薄くて電気特性が劣悪でない材料を介する給電は容易であったが、2つの部屋を区切る鉄筋コンクリートや、石膏ボードのように厚くて電気特性が未知の壁に対しても給電を試みる必要がある。そのために石膏ボードがリピータを介してスパイラル共振器の無負荷 Q (Q_u) を下げることがないか確認してみた。図 17(b)の構造の片側のみを生かして共振器の無負荷 Q を測定しその結果を図 22 に示した。

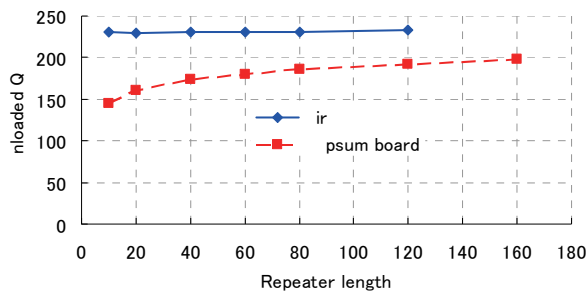


図 22 石膏ボードがリピータを介して Q_u に与える影響

リピータの先に接触している石膏ボードを取り去ってリピータだけを接続した時の無負荷 Q も測定して Air という記号で示しであるが、やはり石膏ボードの誘電損失は無視できないことが分かる。しかしリピータ長を大きくすると回復していくので、石膏ボードによる結合係数の低下とのトレードオフを考えて最適のリピータ長を探す必要がある。

我々の居室と実験室は隣り合わせでその間は石膏ボードで仕切られている。壁の厚さは 14cm、石膏ボードはその両側に貼られており各 2cm 厚でありボードの

間は空気層である。この壁を介しての給電を共振器側ディスク直径 10cm、壁側直径 25cm ワイヤ長 40cm のリピータを壁の両側に設置し、それにオープンスパイラル共振器を各 1cm 離して置き伝送実験を試みた。全体の構成は図 17(b)のとおりである。その結果約 6dB の挿入損失が得られたが、今後スパイラル共振器やリピータ円板の大きさを最適化してより高い伝送効率を目指したい。

5. むすび

結合共振器型 WPT システムに対する銅パイプのリピータ効果をより利用しやすくするために、ディスクリピータという構造を考案した。構造が簡単で小型軽量という特質も備えているため、様々な局面に利用できるものと考えている。今回はその一例として隔壁給電を試みてみた。今後はさらに多様な応用を考えると共に、より便利に使うための工夫もしてみたい。また現在は利用法の開拓が先行し、なぜこのような構造でうまく電力伝送が行われるかという理論的検討が遅れているので、それにも取り組みたいと考えている。

文 献

- [1] 栗井郁雄、小森琢也、石崎俊雄、“共振器結合型 WPT システムの多段化設計と実験,” 信学技報, WPT2010-19, pp.31-36, Jan.2011.
- [2] 栗井郁雄、山口和也、石崎俊雄、“0 オーム定電圧源による“磁気共鳴型” WPT システムの設計理論,” 信学技報, WPT2011-81, pp., Sept. 2011.
- [3] 居村岳広、“磁界共振結合のワイヤレス電力伝送における中継アンテナの等価回路化”, 電学論誌 D, Vol.131, No. 12, pp. 1373-1382, Dec. 2011.
- [4] Jin-Wook Kim, Hyeon-Chang Son, Kwan-Ho Kim and Young-Jin Park, “Efficiency Analysis of Magnetic Resonance Wireless Power Transfer with Intermediate Resonant Coil,” IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett. Vol. 10, pp.389-392, 2011.
- [5] Dukjun Ahn and Songcheol Hong, “A Study on Magnetic Field Repeater in Wireless Power Transfer”, IEEE Trans. Ind. Elec, Vol. 60, No. 1, pp. 360-370, Jan. 2013.
- [6] 澤原裕一、石崎俊雄、堀田昌志、栗井郁雄、“淡水・海水を介するワイヤレス給電の検討,” 信学技報 WPT-2013-03, pp.10-15, April 2013.
- [7] 栗井郁雄、澤原裕一、山口和也、石崎俊雄、“WPT ガイドによる長距離ワイヤレス給電”, 信学技報 MW 2013-15, pp.29-34, May, 2013.
- [8] Ikuo Awai, Yuichi Sawahara and Toshio Ishizaki, “Fabrication of a New High-performance WPT system by Electric Energy Confinement,” IEEE WPTC 2013 Proc., TH-O-3-3, Perugia, Italy, May 2013.