

電界結合技術によるワイヤレス電力伝送技術の可能性

Possibility of Wireless Power Supply by Electric Coupling Technology

原川 健一*1 影山 健二*2 三浦 一幸*3

梗概

電力のラストワイヤ問題解決のために、ワイヤレス電力伝送技術の開発が多方面で進められている^{1), 2)}。その主流は磁界結合によるものである。我々は、磁界結合に比べ重量・コスト・通信機能・資源等の点で有利と考えられる電界結合技術を提案した。

電界結合技術において、回路構成が単純な直列共振方式では、世界で初めて電界で電力伝送ができることを実証した。さらに、ロバスト性の高い並列共振では、結合容量が変化しても伝送電力に影響の少ないことを確認した。これら直列共振・並列共振両方式の特長を生かしたオフィスや工場等での応用展開について提案している。

キーワード：ワイヤレス電力伝送、電界結合、直列共振方式、並列共振方式

Summary

Development of wireless electrical power transmission is progressing in many fields in order to solve the last wire problem of electrical power^{1), 2)}. The mainstream of this development is the use of magnetic field coupling technology. The authors propose electric field coupling technology which is considered to have advantages compared with magnetic field coupling technology in terms of weight, cost, communication function, resources, etc.

Using electric field coupling technology, we have demonstrated electrical power transmission by an electric field using a series resonance circuit configuration for the first time in the world. Also it has been confirmed that in the highly robust parallel resonance system, the effect of changes in the coupling capacitance on the electrical power transmission is small. Practical applications in offices and factories are proposed that utilize the advantages of these series resonance and parallel resonance systems.

Keywords: wireless power supply, electric coupling, series resonance, parallel resonance

1 はじめに

家電やオフィスの情報機器において、無線LANなどの情報系に比べ立ち遅れている電源のラストワイヤ問題解決のため、電源のワイヤレス化が求められている。

医療・介護施設において、少子高齢化に伴い需要が高まると予想されるパワーアシストスーツや移動ロボットは、現状ではバッテリーの容量の点で稼働時間に限りがある。ワイヤレス電力伝送により小容量バッテリーを逐次充電しながらの使用が可能となり、実用性が格段に高まる。また、電気自動車への充電もプラグから解放されて利便性が大きく向上する。

建築分野でのユビキタス環境の実現のためには、空間知能化の実現が重要となる。空間知能化とは、「センサネットワーク」、「情報ネットワーク」、「パワーエレクトロニクス」の3要素の融合により実現されるものであり、空間知能化を基盤にして人と機器や建築設備とのインタフェースを備えたインフラ設備の実現が必要とされている。

これを支えるワイヤレス電力伝送技術を空間知能化のパワーエレクトロニクスの基幹と位置付け、建築空間における電源のワイヤレス化へ向けた技術開発を行っている。これにより、設備機器や電気機器の使用において自由度

*1 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*2 技術研究所 主席研究員 Senior Chief Researcher, Research & Development Institute
*3 技術研究所 研究員 博士(工学) Research & Development Institute, Dr. Eng.

の高い建築空間を構築できる。

上記のことを実現するための技術として、電界結合方式のワイヤレス電力伝送技術についてその特徴と今後の展開について述べる。

2 電界結合電力伝送技術の原理と特長

2.1 電界結合電力伝送技術の種類とねらい

電界結合電力伝送技術は、絶縁層を挟んだ送電側の電極と受電側の電極により電界を介して電力伝送できる技術である。絶縁層とそれを挟む電極によりコンデンサが形成される（以下、「接合容量」と呼ぶ。）。このコンデンサに高周波電流を流すことにより、電力が伝送できる。ただし、コンデンサのみを利用した結合では、コンデンサのインピーダンスが高いため電流を効率的に伝送できない。

これを解決するため、直列共振方式、並列共振方式、アクティブキャパシタンス方式³⁾の三種類の電界結合電力伝送方式を提案している。これらのうち、最も基本的な技術であり机上のノートパソコン等のように平面度の高い平板上に置かれ、電極の密着度が確保しやすい固体体に対して安定して高効率に電力伝送がするのに向いている直列共振方式と、凹凸があつて平面度を確保しにくかったり、ゴミ等があつて接合容量の変化があつても電力伝送でき、ロボットなどの移動体への適用が可能な並列共振方式について述べる。

最終的に実現すべきシステムは以下の特性を有するべきと考えている。

- 高効率なエネルギー伝送能力を有すること。
- 高い安全性を有すること（感電対策、EMI対策、防火性）。
- フリーポジションで受電が可能なこと。
- 構造がシンプルで、安価であること。
- 資源的裏付けがあること。
- 施工・補修が容易なこと。

また、付加機能として、高速通信機能を有し、家電のスマート化、システム化、センサネットワークへの対応等が容易であることが望ましいものと考えている。

2.2 直列共振方式

直列共振はコンデンサとコイルを直列に接続して電源周波数に共振させるものである。Fig.1に直列共振電力伝送回路を示す。破線から上が受電部であり、破線から下が送電部である。破線は絶縁層であり、例えばテーブル上面の化粧板、壁紙、床表面材等がこれにあたる。この絶縁層を挟んで送電部の電極と受電部の電極を置くことによりコンデンサ（接合容量）を形成する。二つの接合容量（ C ）を介して、電源（ f, v ）、コイル（ L ）、負荷（ R ）を直列に接続する。Fig.1の送電部にあるコイルは、受電部に置いて、両方に分けて置いてもコイルのインダクタンスの合計値が L であれば動作する。

$$i = \frac{v}{R + j\left(\omega L - \frac{2}{\omega C}\right)} \quad (\because \omega = 2\pi f) \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$i = \frac{v}{R} \quad (3)$$

Fig.1の直列共振回路に流れる電流 i は、(1)式で表わされる。ここで、電源周波数（ f ）と接合容量のキャパシタンス（ C ）とコイルのインダクタンス（ L ）との間で(2)式の関係を満たす時、直列共振状態になり、(1)式の分母の虚数部が零になる。この結果、(1)式は(3)式のようになり、接合容量が無くなって、電源と負荷が直結された状態になる。このため、(2)式の共振条件が満足されたときには、電源に直接接続した場合と同等の電力を伝送すること

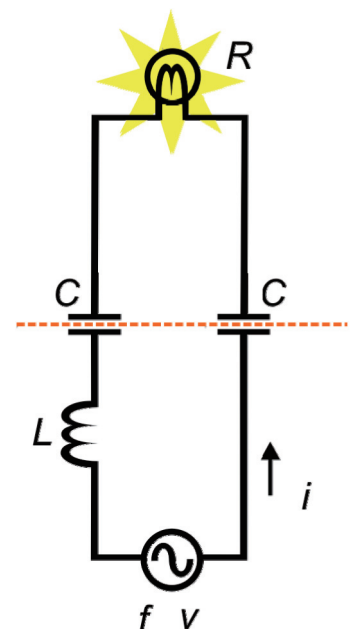


Fig.1 直列共振電力伝送回路

が可能になる。

直列共振は回路が簡単で素子数が少ないことから、ロスが小さく、机上に置かれた機器等のように接合容量が安定して得られる場合には、高効率で電力伝送が可能である。

一方、Fig.2に示すような電力伝送床モジュールを複数組み込んで移動体への送電を意図した床において、床の表面に汚れやごみがある場合には安定した接合容量が得られ難く、(2)式の共振条件がずれて高効率の電力伝送ができ難くなる。解決手段としてコイルのインダクタンス (L) を接合容量に応じて共振周波数 (f) が同じになるように変化させるか、共振周波数 (f) に合わせて電源周波数を変化させることが必要となる。

直列共振回路では、共振器の効率に応じてコイルおよび接合容量に高い電圧が印加される。接合容量に印加される電圧は、そのまま絶縁層に印加されるため、絶縁層の絶縁耐圧以下となるような電流値を設定する必要がある。

伝送電力を1.4kW、電源電圧を141V_{op}、負荷抵抗を10Ωにしたときの接合容量の印加電圧が、接合容量と電源周波数によって変化する様子をFig.3に示す。これから判るように、接合容量の大きさが大きいほど、電源周波数が高いほど接合容量に掛る電圧は低くなる。

直列共振回路による電力伝送では、送電側と受電側全体を通した回路で共振系が構成されているため、受電部が移動して接合容量が変化する場合には、対策が必要となる。また、電極に印加される電圧値で送電電力が制約される。接合容量を大きくし、周波数を上げれば、伝送できる電力は増大可能である。

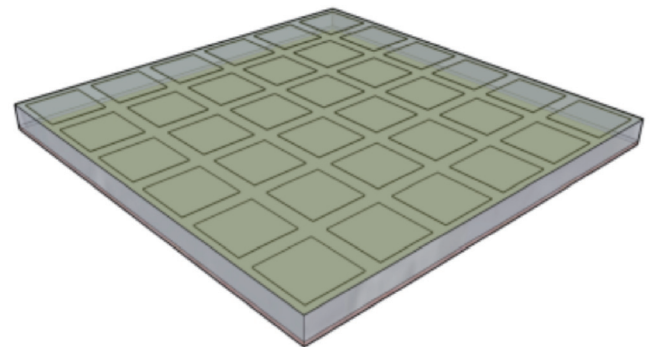


Fig.2 電力伝送床モジュール

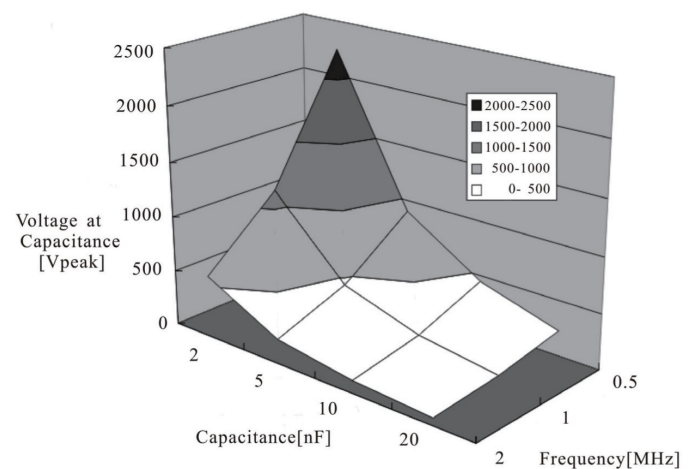


Fig.3 結合容量に印加される電圧

2.3 並列共振方式

Fig.4に、並列共振電力伝送回路を示す。直列共振回路と同じように二つの接合容量を介して回路が構成されている。この回路は、4つの並列共振回路①～④を有している。①②は送電部電極側に、③④は受電部電極側に存在し、それぞれがトランス結合（結合係数0.1）している。また、②と③の並列共振回路は、接合容量で接続している。①の並列共振回路には高周波電源が、④の並列共振回路には負荷が接続されている。

並列共振回路の特徴は、接合容量が共振系の一部を構成していないことである。このため、接合容量が変化しても共振周波数が変わることはない。また、直列共振方式よりも接合容量が小さくても送電可能である。Fig.5に示すように、③の並列共振回路が共振した時には、リアクタンスが極大となる (Fig.6のZ3が極大になる) ため、Fig.6のZ1およびZ2で示す接合容量のキャパシタンスが変化しても、印加された電圧Vinの殆どがZ3に分圧されて出力されるため、接合容量が変化しても伝送電力が保たれる特徴がある。

さらに、並列共振方式は、接合容量の変化に対して高いロバスト性を有しているとともに、小さな接合容量でも電力伝送が可能な利点も有している。

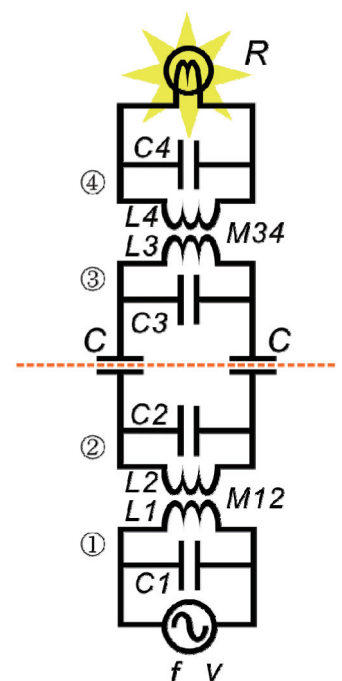


Fig.4 並列共振電力伝送回路

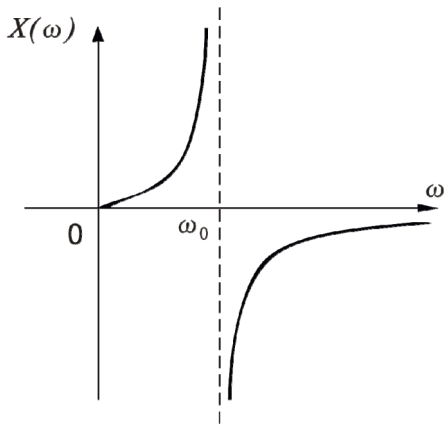


Fig.5 並列共振回路のリアクタンス線図

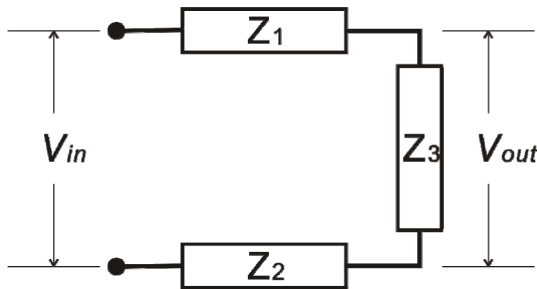


Fig.6 並列共振回路に加わる電圧

3 電界結合方式と磁界結合方式の比較

電界結合電力伝送技術として、直列共振方式及び並列共振方式と、他のワイヤレス電力伝送技術との比較を行った。他のワイヤレス電力伝送技術として、広く開発が進められている磁界結合方式・磁気共鳴方式と比較した。その結果をTable 1に示す。

比較項目は、重さ、価格、伝送効率、位置自由度（水平方向、垂直方向）、動作周波数、安全性、通信機能、資源的問題である。

左側の列が磁界結合方式・磁気共鳴方式であり、右の列に電界結合方式を示した。

重さ・コストは、磁界方式では銅のリッツ線を用いるため、一般に高価である。さらに、フェライト等の磁性体をコアに用いた場合には、さらに重くなる。これに対して、電界結合方式は、小型コイルにリッツ線やフェライトを用いるが、その使用量は磁界結合方式に比べればわずかである。電極としてもアルミニウムや鉄が使用可能なため、安価かつ軽量である。

伝送効率は、電磁誘導方式はコイルの近接効果のために高く取れない。磁気共鳴方式は無線発信機を使用しているため、システム全体を通した電力伝送効率は、現時点では高くすることができない。一方、電界結合方式は、SiC MOSFETやGaN MOSFETを用いるとともに、ソフトスイッチング技術を用いた場合には、95%程度の伝送効率

Table 1 磁界結合方式と電界結合方式の比較

方式 項目	磁界結合方式		電界結合方式
	電磁誘導方式	磁気共鳴方式	
重さ	フェライト、リッツ線を用いるため、重い		アルミや鉄製電極と小型コイルを使用するだけなので軽量である。
価格	フェライトやリッツ線は高価である。		低コストである。
伝送効率	90～95%	距離により変化するが実用域としては、40～95%	条件により異なるが、90～97%（直列共振／並列共振）
位置自由度 (水平方向)	コイルの位置合わせが必要	離して利用可能	フリーポジションで送電可能
位置自由度 (垂直方向)	コイル径の1/3程度離隔可能	コイル径の数倍離隔可能	電極を誘電層に密着させて使用する。 並列共振方式は、電極面積の大きさによって数mm～10cm程度の離隔が可能
動作周波数	50kHz～100kHz	数十MHz	500kHz～数十MHz
安全性	磁界を放射するため、安全基準の制定が求められている。		密着時には電界を放射しにくい。 離隔時は電磁波を放射する。 共振条件が満足されなければ、電流が流れないため、安全性を有している。
通信機能	時定数が大きいため、磁界を媒体とした高速通信は困難である。他の手段を用意する必要がある。		接触容量を介して電力伝送とは別の周波数（GHz以上）で高速通信が可能であり、大容量のデータ伝送が実現できる。
資源的問題 (銅消費量)	将来市況価格の上昇が予想される銅に大きく依存する ⁴⁾ 。		アルミ、鉄を主体に使用するため、資源的負担は少ない。

を目指すことができる。さらに、電極間の距離を取れば、電極の誘電損失も低減できるため、97%程度まで伝送効率を高められる可能性がある。このように、伝送効率の点では、電界結合方式は磁界結合方式や磁気共鳴方式に大幅に優位となる可能性がある。

位置自由度の点では、磁気共鳴方式が最も自由度が高い。受電コイルを送電コイルの横や前に持っていても送電可能である。電磁誘導方式は、横方向には動かせないが、垂直方向にはコイル径の1/3程度まで離隔することは可能である。これに対して、電界結合方式は接合容量を小さな面積で実現しようとした時には、電極を絶縁層に密着させる必要があるが、並列共振方式では電極面積に比例した距離だけ離隔して使用することが可能である。電界共鳴方式は平面内ではフリーポジションで使用できる可能性がある。

安全性について、電磁誘導方式は比較的狭い空間のみに磁界を形成し人体への磁界曝露を低減できるが、磁気共鳴方式は空間に磁場および電場を放射することを前提としているため、人体曝露への十分な配慮が必要である。これに対して電界結合方式は、電極の極近傍で電界を発生させるため、人が被曝する可能性は極めて低い。

将来の資源的問題としては、ベースメタルとしての銅の供給が需要に追いつけなくなる可能性が指摘されている。磁界共鳴方式は、銅のコイルを多用するため、自動車への電力伝送等インフラとして使用されたときには、銅の市況価格を上げ、低コスト化できなくなる可能性がある。電界結合方式は、銅線の使用量は小型コイルに使用するだけであり、電極としてはアルミニウムが利用できるため、ベースメタルである銅への依存度を小さくすることができる。

以上、磁界結合方式と電界結合方式を比較したが、多くの比較項目で電界結合方式の方が有利であり、技術的競争力はあると思われる。

4 電界接合方式の課題

電界結合方式には、直列共振方式および並列共振方式があるが、これらの回路要素としては、電極、コイル（直列共振）、トランス（並列共振）、インバータ等がある。

コイルは、直列共振用の共振回路に使用するものであり、電磁波放射の低減、高周波損失の低減（近接効果による損失の低減）、直流抵抗の低減、小型化を図る必要がある。さらに、共振時に電圧が印加されるため、高い耐電圧を持たせなければならない。トランスは、並列共振用の共振回路において使用するとともに、隣接共振回路との接合に使用する。その結合係数は0.1～0.16の弱結合とする。電磁波放射の低減、高周波損失の低減、直流抵抗の低減、小型化については、コイルの場合と同じ配慮が必要である。

インバータは、低損失性、耐電圧性、大電流容量、ゲート回路周り（低ノイズ性、遅延特性）、高速スイッチング性を考慮して、素子としては、Si MOSFET、SiC MOSFET等を採用することを検討している。また、ソフトスイッチングを用いた低損失化も図らなければならない。

電界結合方式で最も大きな課題が電極である。以下にその概要を述べる。

4.1 直列共振の電極

直列共振方式においては、受電部電極を絶縁層の付いた送電部電極に接触させて接合容量を構成する必要がある。受電部電極と絶縁層（誘電層）の平面度を高くして接合させても、ミクロ的には点接触しており、その間には隙間が存在し、多くの場合は空気が満たされている。

このときの平面度と接合容量の関係を検討した。

Fig.7には、絶縁層および送電部電極を完全平面とし、受電部電極に二次元的に正弦波のうねりを与えたモデルを示した。シミュレーションには二波長のうねり波長サイズ（2mm）のモデルを用いた。Fig.8には受電部電極と誘電層間のすき間を空気で満たした場合、圧力を加えると変形して凹凸部になじむ導電性の柔らかい電極（以下、「導電性ソフト電極」と言う）で埋めた場合の結果を示している（Ansoft社

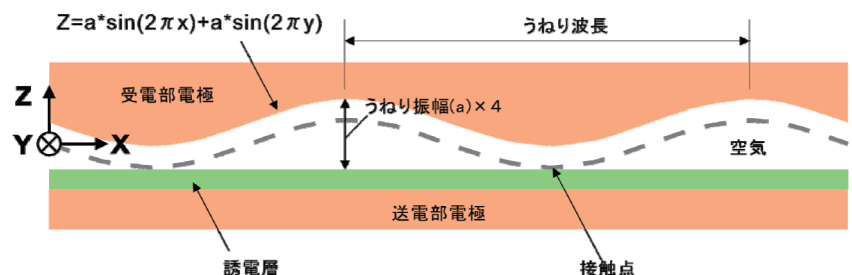


Fig.7 接合容量部のシミュレーションモデル

のQ3Dを使用)。

また、厚さ50 μm の誘電層の比誘電率を3または15にした場合の結果を示している。これより、密着している場合(うねり波長に対するうねり振幅が0%の時)には、誘電層の誘電率に応じた接合容量が得られているが、受電部電極に多少のうねりが発生すると、接合容量は急激に落ちることがわかる。その結果、誘電層の誘電率には関係なく低い値に収束する。これに対し、隙間を導電性のソフト電極(Agフィラーを混入し、 $\sigma = 40\text{s/cm}$ とした導電性シリコン)を押しつけて空気を追い出した時には、殆ど静電容量が低減していない。

このシミュレーション結果より、受電部電極に導電性ソフト電極を用いることは、電界結合非接触電力供給にとって有効なことが判る。さらに、砂粒等の固い物が挟まった時でも、多少の圧力があればソフト電極自体が凹んで密着性を維持できる利点もある。

4.2 並列共振の電極

凹凸の大きな面、小石等がある場合には、ソフト電極を使用しても、対応できない場合がある。このような場合に対応すべく、隙間を開けて電極を構成する方法を検討した。

並列共振電力伝送回路は接合容量が小さくても電力伝送が可能であることを述べた。Fig.9には、一例として接合容量が0.3nF~0.8nFが与えられた時、凡例に示される電極の面積が利用できれば、縦軸に示された離隔距離を取ることが可能なことを示している。このグラフは、1MHzのときの計算結果であるが、周波数を上げればさらに離隔距離を延ばすことが可能になる。なお、Fig.9はコンデンサの容量を計算する際に用いられる(4)式を用いて作成したグラフである。(S: 電極面積, d: 電極間距離, ϵ_0 : 真空の誘電率)

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (4)$$

5 実験機による実証

Fig.10に、直列共振方式を用いて実際にワイヤレス電力伝送システムを製作した例を示す。送電部電極側の誘電体はBaTiO₃粒子を混合したエポキシ樹脂であり、誘電率は42、厚さ0.3mmである。電源はシリコン製のMOSFET (Cool MOS) で構成されたインバータ

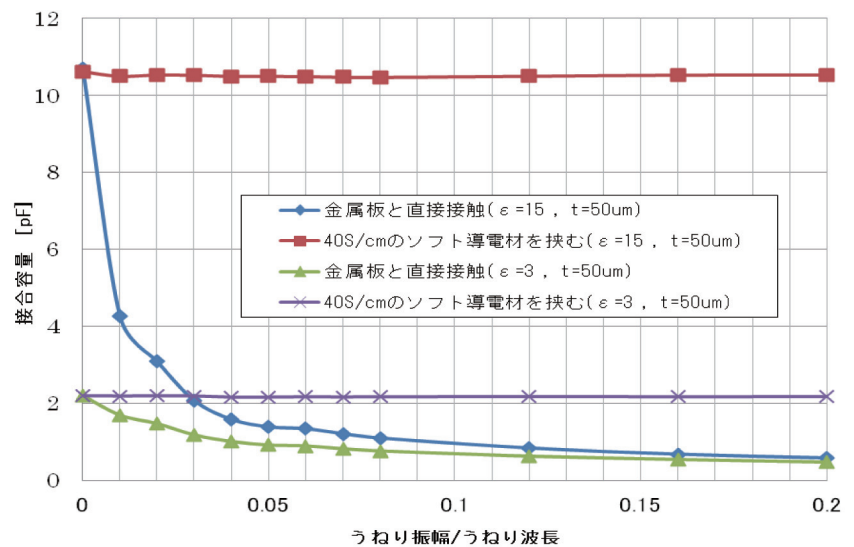


Fig.8 接合容量のシミュレーション結果

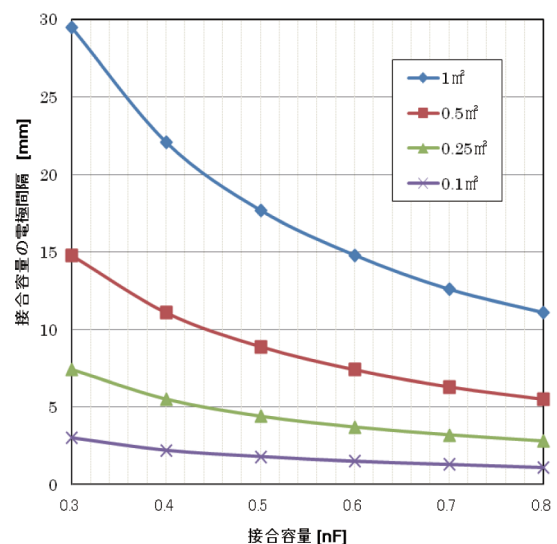


Fig.9 コンデンサの容量と電極間隔の関係



Fig.10 直列共振による送電の様子

である。受電部電極には、Agフィラーを混合した導電性シリコン樹脂 ($\sigma = 40$ [S/cm]) を用いた。白熱電球は、電球が付けられている板の下に張った導電性シリコン樹脂付き電極と導線で結ばれており、その電極サイズは各辺10cmである。この装置を用いて600kHzの発振周波数にて90Wの電球を90%の効率で点灯させることができた。

安全性を確認するために、通電状態の電極の誘電体に直接手を触れることを試みた。受電体（受電部電極および電球）を外して、送電電極がむき出しの状態とし、この時に送電電力を最大にして二つの誘電層付き送電電極に実際に手で触ったが感電しなかった。この状態で、受電体を乗せると点灯する。受電体は、直列共振を起こすために必要な電極面積と大きな接合容量を実現するための導電性ソフト電極を有し、共振条件を満足するように作られている。このために、受電体を載せた時に電力が伝送され、電球が点灯する。逆に言えば、共振条件を満足しない手や金属片を誘電層付き送電電極の上に載せても電力は送電されない。これは、本方式が原理的に有している安全性である。

本直列共振方式の実験の結果、安定した電力伝送を達成していることが電球の輝度により確認できた。

なお、我々の知る限りでは、電界結合のワイヤレス電力伝送技術として実際に示したのは、本実験が世界で初めてである。

6 応用

以上、電界結合式のワイヤレス電力伝送技術の基本的特性について述べてきた。これより、本方式は電極に密着して使用する場面、または少し距離を離して使用する場面に利用可能である。

現在考えている適用先を下記に示す。

適用先の最も基本的なものはテーブル上の機器や、壁面に取り付けた機器への電力伝送する場合である。Fig.11にはテーブルからのワイヤレス電力伝送のイメージを記す。テーブルの上に置かれたPCおよびプロジェクターにはコードは一切なく、テーブルの上にフリーポジションで置いてだけで送電され、ビデオデータも電力伝送している電極を介して高速に送信される。

Fig.12に示すようなロボットやパワードスーツへの活動しながらの充電についても、本技術の大きな適用先である。これは、我が国が今後迎える少子高齢化社会において、労働者への支援、介護現場での老々介護の支援等において不可欠になると予想される。この場合には、電力伝送床モジュールとロボットの足裏に受電部を付けなければならない。電力伝送床モジュールには、位置情報をロボット等へ送信し、ロボットが常に自身の位置を認識して活動できるような、情動的支援機能を付けることもできる。さらに、壁に付けられたカメラやセンサからの情報もロボットに提供し、被介護者に対して正確な位置情報を提供することも可能である。ロボットが有するセンサだけでは、被介護者の位置情報や姿勢情報を正確に把握することは困難である。

一方、電極間の距離を開けて送電する用途としては、Fig.13に示すようなプラグインハイブリッド車、電気自動車への電力伝送がある。車への用途では、夜間充電の場合の3kW、急速充電の場合の50kWの電力伝送を想定した場合にも、伝送効率のみからするとボディ下面の電極にゴミが付着していても接触式で電力伝送が可能となるものである。

Fig.13には、車の例を示したが、車以外には、ゴルフカート、電動ターレ、電動ワゴン、フォークリフトなどにも広く適用できる。

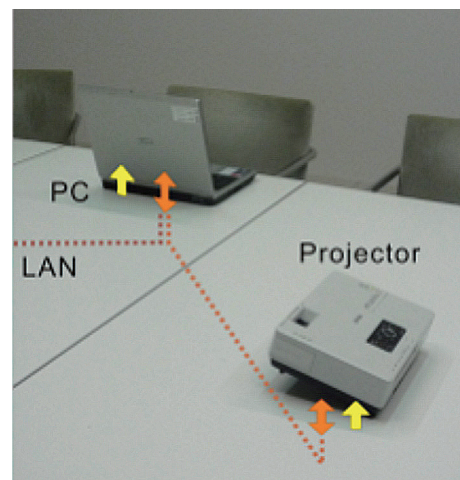


Fig.11 テーブルでの適用イメージ

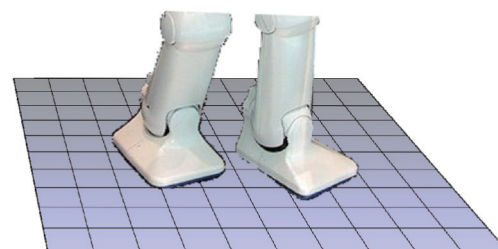


Fig.12 電力伝送床によるロボットへの送電



Fig.13 EV車への非接触充電

金属製の筒の内面がテフロン等でコーティングされたすべり軸受は、金属製の筒と金属製の軸の間でコンデンサが形成されるため、すべり軸受を介して電界方式で回転軸に電力伝送することができる。今までの回転体に対する電力伝送では、スリップリングを用いているが、これはもっとも壊れやすい部品の一つである。これをより安定なものに交換できるならば、機器の信頼性はかなり向上すると思われる。このすべり軸受を用いた電力伝送機構の用途としては、建築用のタワークレーンへの電力伝送、ターンテーブル上の機器への電力伝送等がある。

以上、適用可能と目される用途について概観してきた。かなり広い用途で用いることができる基礎的技術であることが判る。

7 まとめ

電界結合方式のワイヤレス電力伝送技術として、直列共振方式および並列共振方式について概説するとともに、それぞれの特徴を明らかにしてきた。これより、直列共振方式は伝送電力が接合容量の変化の影響を受けるが、受電部電極にソフト電極を使用することで安定した送電が可能なることを実験的に示した。これに対し、並列共振方式では、接合容量の変化に対してロバスト性を有する優れた特性を有していることが判った。さらに、並列共振方式では接合容量を小さくしても電力伝送できるため、電極面積を大きくすれば、電極間隔を広げて使用することも可能である。このことは、電極間に小石等が挟まっても、送電できるシステムを設計できることを示しており、更にロバスト性を高めることができる。

一方、電界結合方式と磁界結合方式を比較すると、送電部と受電部（コイル間隔）を離せる点では磁界結合方式の方が優れているが、重さ、価格、伝送効率、通信機能、資源的対応の点では電界結合方式が優れており、方式として競争力を有していることが判った。

我々は、電界結合方式のワイヤレス電力伝送を提案する以前は、磁界方式の非ワイヤレス電力伝送、接触式のコードレス電力伝送技術、ハイパワーマイクロ波による電波吸収体加熱等の研究を行ってきた。これら方式の問題点を把握し、克服する過程で電界結合方式にたどりついた。当初は実用化には最も遠い技術とされていたが、共振技術を組み合わせること、高周波動作可能なパワー半導体素子の登場によって現実的になってきたものである。

近い将来到来する少子高齢化による労働力不足、介護老人の増加は、社会に重い負担を強いることが予想される。このような状況を乗り切るためには、パワードスーツやロボット等の力を借りることが不可欠になってきたようである。このようなロボットを真に使いやすいものにするためには、操作者はロボットへの充電などを考えなくて済むシステムが必要である。このような方式として、床からの電力伝送の開発が急がれる。

他にも広い用途が考えられ、一刻も早く実用化して具体的な施設の建設を実現させ、世の中のニーズに答えてゆかなければならない。

ただし、電磁波放射問題、感電対策を含めた安全性のさらなる向上、低コスト化、システム化等を検討し、早急な実用化を図りたい。

参考文献

- 1) T. Sekitani, et al., "A large-area wireless power-transmission sheet using printed organic transistors and plastic MEMS switches", *nature materials*, Vol.6, pp.413-417, 2007.
- 2) Karalis, A, et al., "Efficient wireless non radiative midrange energy transfer", *Annals of Physics*, vol.323, pp.34-48, 2008.
- 3) 知久, 船渡, 原川: "アクティブキャパシタを用いた電界結合非接触電力供給の提案", 電気学会研究会, Jul. 2007.
- 4) 安達: "元素の枯渇問題 鉱物資源の世界情勢と将来のゆくえ", 化学, Vol.62, No.12, 2007.