

磁界結合型無線電力伝送の基礎

Basic Lecture of Magnetic Coupling Wireless Power Transfer

平山 裕[†]Hiroshi HIRAYAMA[†][†] 名古屋工業大学[†] Nagoya Institute of Technology

概要

磁界結合型無線電力伝送には、パワーエレクトロニクスに基づく方式や、マイクロ波・アンテナ技術に基づく方式など、様々な技術基盤による方式が存在する。本講演では、結合と共振の観点から磁界結合型無線電力伝送の原理を明らかにすることにより、多様な無線電力伝送方式を統一的に説明する。

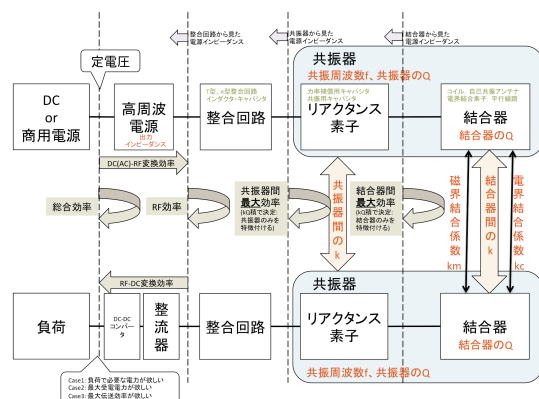


図 磁界結合型無線電力伝送の構成要素とパラメータ

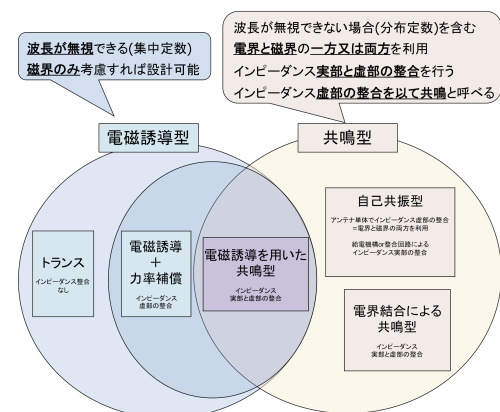


図 電磁誘導型と共鳴型の関係

Abstract

There are many kinds of implementation of magnetic coupling wireless power transfer (WPT). Some system utilizes power electronics technology whereas other system utilizes microwave / antenna technology. Since WPT technology use high frequency and high power, fusion of high-power technology and high-frequency technology is necessary. In this lecture, the basic theory that attempts to fully describe various kinds of wireless power transfer systems from a viewpoint of coupling and resonance is presented.

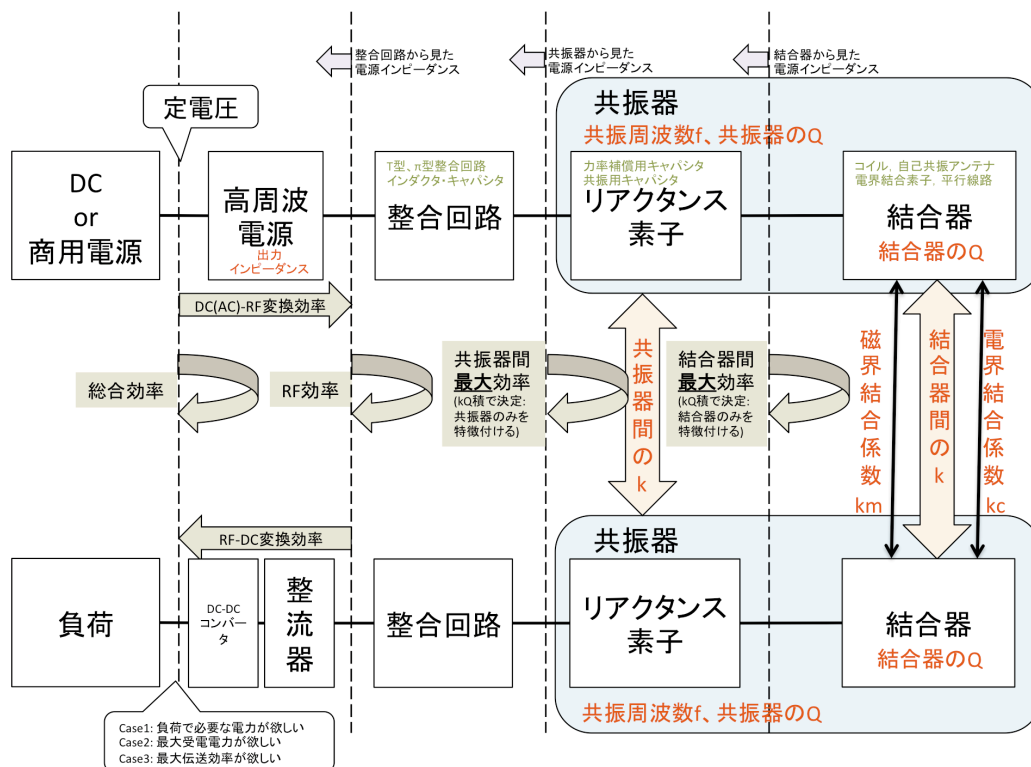


図1 磁界結合型無線電力伝送システムの構成要素とパラメータ

1. はじめに

無線電力伝送技術は古い歴史を持ち、コードレスホンや電動歯ブラシなどで実用化されている電磁誘導を用いたもの、宇宙太陽光発電での実用化が期待されているマイクロ波を用いたものが従来から存在していた。前者の技術はインバーターなどで利用されているパワーエレクトロニクス技術、後者の技術は通信用のマイクロ波技術を基盤にしており、技術的にも、学術的にも、全く異なる技術として成立してきた。

2007年にMITにより提唱された、いわゆる「共鳴型」[1]により、にわかに無線電力伝送への関心が高まった。それ以来、パワーエレクトロニクス技術によるもの、マイクロ波技術によるもの、アンテナ技術によるものなど、各種の無線電力伝送方式の研究が活発に行われている。しかしながら、これらは、それぞれ、異なる学問・技術体系をバックグラウンドとしているため、これらの技術相互の関係を理解することが有用である。

本稿では、磁界結合型無線電力伝送技術の本質を明らかにすることにより、多様な技術に基づく方式を統一的に説明することを目的とする。

2. 結合共振型無線電力伝送システムの構成要素

2.1. 構成要素のモデル

近傍界を用いた結合型無線電力伝送には、結合共振型のほかに、走行中給電などに適した1次元の導波路を用いたものも提案されている。このような方式にも適用可能な、一般化したシステムモデルを図1に示す。

2.2. 構成要素

2.2.1. 結合器

結合型無線電力伝送の本質は、近傍電磁界を用いて、電力の空間伝送を行うことである。電気回路素子としての端子を持ち、電磁界と電気回路の間でエネルギー変換を行うデバイスを、ここでは結合器と呼ぶ。kHz帯を用いた電力伝送であれば「コイル」が結合器となる。MHz帯以上において使われる「自己共振素子」もここに位置する。

結合器は無線電力伝送における最重要なデバイスであるにもかかわらず、この部分を指す名称について、統一的なコンセンサスは取れていない。この部分を「共振器」と呼ぶ例もあるが、「コイル」を用いた電力伝送であれば、コイル単体では共振しないため、「コイル」だけを指して「共振器」と呼ぶことは適切では無い。また、「アンテナ」という呼称もある

が、電子情報通信学会の定義によればアンテナは「電磁波」と回路の間のエネルギー変換デバイスである。結合型無線電力伝送においては「電磁界」を利用しているが「電磁波」を利用しているのではないため、「アンテナ」という呼称も適切とは言えない。

送電側と受電側の結合器は、電界結合と磁界結合によって結合し、電力を輸送している。結合器としてコイルを用いた場合は、磁界結合が支配的であるが、自己共振素子を用いた場合は磁界結合と電界結合の両方の影響を考慮する必要がある[2]。

結合器は急峻な周波数特性を持つ場合も持たない場合もある。コイルを用いた場合は、トランスとして動作するため結合器自体では急峻な周波数特性を持たない。自己共振素子を用いた場合は結合器が共振器としても動作し、急峻な周波数特性を持つ。

結合器は、結合器の損失を表す Q 値と、結合器間の結合を表す結合係数で特徴づけられる。 Q 値にもいくつかの定義が存在するが[3]、無負荷 Q 値は結合器そのものを特徴づけ、リアクタンス素子・整合回路などの付加回路や結合器間距離には依存しない。

送受電の結合器間は4端子(2ポート)回路網とみなせるため、端子間の特性を S パラメータなどにより特徴づければ、達成可能な最大効率が一意に決定する[4]。この最大効率は結合器のみを特徴づける量であり、外部回路には依存しない。結合器の構造が決定しているのであれば、整合回路やリアクタンス素子は、この最大効率を実現するための付加回路とみなすことができる。

一方、最大効率をより向上させる場合は、結合器の物理的な形状を工夫する必要があり、電磁気学的な立場からの結合メカニズムの理解が必要不可欠である。

送受電の端子間の特性は、等価回路で表現することもできる。しかし、等価回路はあくまで端子間の特性だけを等価的に表現したものであり、送受電器間の電磁気学的な特徴を表現したものとは限らないことに注意が必要である。例えば、自己共振素子の結合による周波数特性を、トランスとキャパシタを用いた等価回路で表現することができる。この場合、等価回路においてトランスが用いられているから送受電間の結合が電磁誘導のみで説明できるというのは誤りである。電磁気学的現象を等価回路で表現するのであれば、電界結合と磁界結合を考慮した等価回路で表現する必要がある[5]。

2.2.2. リアクタンス素子と共振器

kHz 帯の無線電力伝送においては、結合器として

コイルを用い、漏れ磁束による誘導性リアクタンスをキャパシタにより補償する方式が用いられる。この場合、キャパシタは電磁界を発生させるデバイスではなく送受電間の結合に直接は寄与しないので、結合器とは分けて考える必要がある。

リアクタンス素子は、結合器のインピーダンスのリアクタンス成分を打ち消すためのものである。インピーダンスの虚部が0になる事を以て共振と定義するならば、リアクタンス素子と結合器によって共振器が構成されているといえる。

なお、整合回路もリアクタンス素子としての役割を持っている。「共振」「力率補償」といったインピーダンス虚部のみを0にする考え方を積極的に用いない場合は、リアクタンス素子は用いないことになる。また、結合器として自己共振素子を用いた場合は、それ自体で共振器として動作するため、リアクタンス素子を用いないことになる。これらの場合もインピーダンス0のリアクタンス素子が使われていると考えれば、このモデルの一般性は失われない。

共振器を特徴づけるパラメータは共振器の Q と共振器の結合係数 k である。これらのパラメータは共振モードに対して定義されているため、周波数特性を持たない。結合器の Q や k と混同しないことが重要である。

2.2.3. 整合回路

電磁誘導を用いた無線電力伝送は古い歴史を持ち、リアクタンス素子による力率補償や、共振コンデンサの使用は当然のように行われてきた。それにも関わらず、MITの論文によって「結合共振型無線電力伝送」が注目を浴び、実際に従来の電磁誘導では実現できない伝送距離を達成できたのは、インピーダンスの虚部だけでなく実部も調整することにより受電電力を最大化する考え方を取り入れたためである。電工工学では、電源電圧を一定とし負荷インピーダンスは負荷の電力需要によって変動することを暗黙の前提としている。ここに、共役映像インピーダンス整合という高周波工学の考え方を取り入れたのが結合型無線電力伝送の特徴といえる。

高周波電源の出力インピーダンス、負荷が接続された整流器の入力インピーダンスは、結合器とは無関係に決定する。このインピーダンスを、結合器によって決定する最大効率を実現するための最適インピーダンスに変換するのが整合回路の役割といえる。送受電器間の伝送距離や負荷インピーダンス(負荷の需要電力)によって最適インピーダンスは変化するため、常に最大効率を得たい場合は可変コンデン

サなどの可変素子が必要である。

2.2.4. 高周波電源・整流器

結合器・リアクタンス素子・整合回路は受動素子が使われるのに対し、高周波電源・整流器は能動素子が主要なデバイスとなる。通信工学の分野では情報の伝送を目的としているため波形を歪ませないことが最重要な設計目標になる。一方、無線電力伝送の場合は電力変換効率が最重要な目標となるため、スイッチング動作を利用することが多い。

高周波電源の出力インピーダンスとは、電源から取り出せる電力が最大となるときの電圧と電流の比である。テブナンの等価回路で表現すると電圧源に実抵抗である出力インピーダンスが直列に接続されているため、出力インピーダンスで電力が消費されるように見える。これは、「電圧源」という仮想的な素子を用いているために生じる現象である。現実には出力インピーダンスで電力が消費されるわけではない。

2.2.5. 電源・負荷

電源は通常、商用電源かバッテリー(DC)となる。システムとしては電源から負荷への総合効率が最終的な評価指標になる。

負荷は入力インピーダンスにより特徴づけられる。通信システムの場合は負荷を定インピーダンス素子とみなせるが、無線電力伝送システムにおいてこのようになるのは稀である。

理想的な無線電力伝送システムは、負荷に対して定電圧を供給するシステムであるといえよう。この場合、負荷のインピーダンスは負荷の電力需要により変動することになる。

整流器から見て伝送効率や受電電力が最大になるインピーダンスと、負荷の入力インピーダンスが異なる場合、DC-DC コンバータを用いることによりシステムとしての効率を最大化することができる。

2.3. 構成要素と物理的な構造の対応について

このモデル中の構成要素と、物理的な構造・回路は必ずしも一対一に対応するものではないことは注意が必要である。例えば、MIT のデモンストレーション[4]で用いられた、オープン型ヘリカル共振器の近傍に給電用ループを置いた構造において、ヘリカル共振器はモデル中の結合器に対応する。一方、ヘリカル共振器と給電用ループの間の距離を調整することにより電源から見たインピーダンスの実部を調整している。このため、ヘリカル共振器と給電用ループの結合が整合回路の役割を担っており、給電用ループ自体を以て整合回路と呼ぶことはできない。

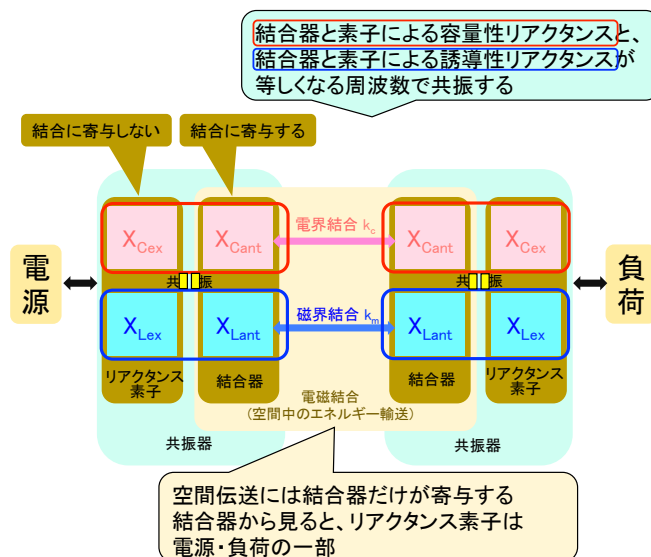


図2 結合と共振から見た無線電力伝送モデル

3. 結合と共振の観点からの、磁界結合型無線電力伝送の原理

3.1. 結合共振モデル

結合と共振の観点から、多様な無線電力伝送を統一的に説明できるモデルを図2に示す[2]。

前節で述べたように、共振器はリアクタンス素子と結合器により構成されている。また、前節における整合回路は、この図では、電源・負荷に含まれている。リアクタンス素子・結合器は、ともに容量性リアクタンス成分と誘導性リアクタンス成分により構成されている。

結合の観点からは、送電側と受電側の結合器の容量性成分同士は電界結合により、誘導性成分同士は磁界結合により結合している。

共振の観点からは、リアクタンス素子と結合器の誘導性成分と容量性成分が等しくなったところで共振することになる。

3.2. 結合共振モデルを用いた動作原理の説明

3.2.1. 自己共振アンテナを用いた場合

MIT が初めに行った実験では、共振器として、両端が開放された自己共振アンテナが用いられた。自己共振アンテナは図3のように、主として中央部を流れる電流による等価ループと、主として端部にたまる電荷による等価ダイポールに分解できる。

図2におけるモデルを用いて、自己共振型アンテナによる電力伝送の原理を図4に示す。自己共振アンテナは、リアクタンス素子を用いることなく共振を

起こすが、これは結合器自身が誘導性リアクタンスと容量性リアクタンスの両方を持っているためである。この結果、電気的エネルギーと磁氣的エネルギーの両方が空間に蓄積されていることになり、結果的に電界結合と磁界結合の両方が電力伝送に寄与することになる。

MIT のモデルは「磁界結合型無線電力伝送」と呼ばれることが多い。しかしながら、磁界結合が主要であっても、電界結合が無視できない。例えば、自己共振アンテナを用いた場合、送電側と受電側のコイルの巻き方を逆とした方が、同じ方向に巻いた場合よりも結合が強いことが知られている[6]。これは、電磁誘導だけでは説明のつかない現象である。自己共振を用いたアンテナの場合、電界結合と磁界結合の位相関係により、このような現象が出てくる。また、電界結合と磁界結合の両方を積極的に利用した方式も提案されている[7]。

自己共振によりインピーダンスの虚部の整合は行われるが、実部を調整するための機構は別に必要である。ループコイルによる間接給電は、インピーダンスの機構といえる。

3.2.2. 結合コイルとキャパシタを用いた場合

パワーエレクトロニクスを基盤とした技術など、結合にはインダクタとして動作するコイルを用い、共振用コンデンサを用いた場合の回路構成は図5のようになる。1次側コイルと2次側コイルが通常のトランスと同様の電磁誘導の原理により結合している。1次側と2次側の距離が離れることにより漏れ磁束が発生するが、結合に寄与する磁束を理想トランスとして等価回路で表現すると、漏れ磁束は直列に接続されたインダクタとして表現される。

図2に示すモデルでこの場合の動作原理を説明したものが図6となる。結合器であるコイルは誘導性リアクタンス成分のみをもっている。このため、共振器を構成するためには、リアクタンス素子としてのキャパシタが必要になる。一方、このために送受電側の結合器は磁界によってのみ結合され、電界結合の影響は無視できる。

共振器という立場で見ると、電気的蓄積エネルギーと磁氣的蓄積エネルギーが等しくなることが共振の条件となる。コイルとキャパシタを用いた場合は、電気的蓄積エネルギーはキャパシタの極板間に局在し、結合には寄与しないことになる。

結合コイルとキャパシタを用いた場合も、実部の整合機構は必要となる。最適負荷インピーダンスは伝送距離に依存するため、伝送距離が変化する場合にそれに追従してインピーダンスを変化させる機構が必要となる。

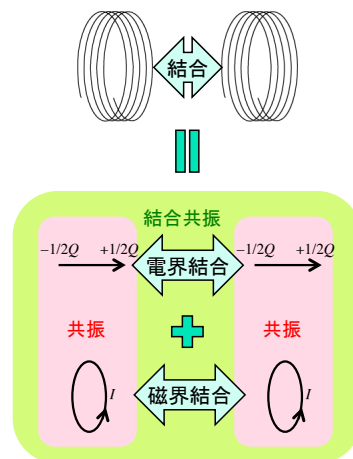


図3 自己共振アンテナを用いた場合の等価ループ・ダイポールモデル

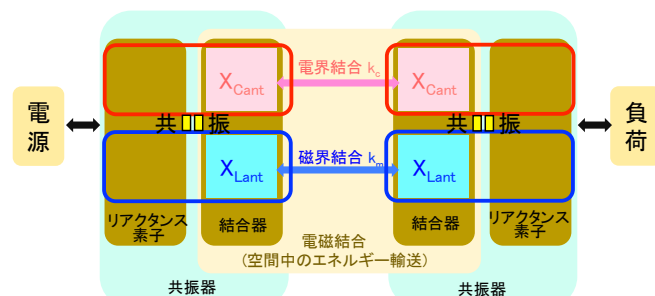


図4 自己共振アンテナを用いた場合の結合・共振モデル

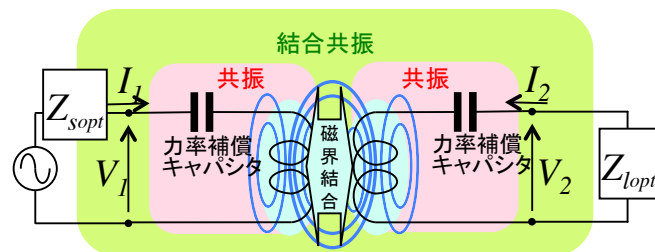


図5 結合コイルと共振用キャパシタを用いた場合の回路構成

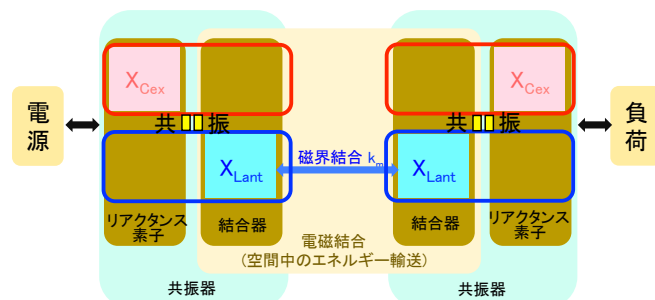


図6 結合コイルと共振用キャパシタを用いた場合の結合・共振モデル

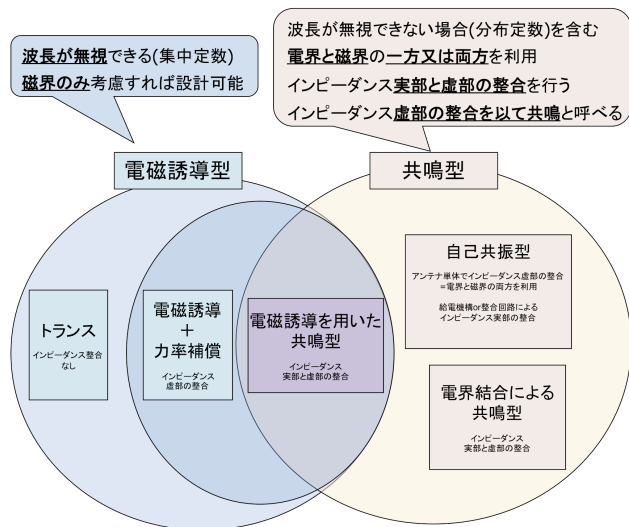


図7 電磁誘導型と共鳴型の関係

3.3. 電磁誘導型無線電力伝送と共鳴型無線電力伝送の関係

電磁誘導を用いた WPT システムと、共鳴を用いた WPT システムの関係を図7に示す。

電磁誘導の原理をそのまま用いたものはトランスである。1次側と2次側の間隔を空ければ無線電力伝送が可能であるが、漏れ磁束による力率の悪化により、急激に効率が悪くなる。

漏れ磁束による力率をキャパシタにより補償したものが、コイルとキャパシタを使用した無線電力伝送である。電動歯ブラシなどで従来から用いられているのは、この方式である。インピーダンス整合の観点からは、インピーダンスの虚部のみを整合させる方法と言える。そのため、負荷インピーダンスは電力の需要のみにより決定し、受電電力最大条件を満たさないため、伝送距離は限られたものとなる。

送電側と受電側で同時に複素共役整合をとる、共役影像インピーダンス整合を適用したものが、電磁誘導を用いた共鳴型である。インピーダンスの実部と虚部を調整するために、2個以上のリアクタンス素子を用いる必要がある。

「電磁誘導を用いた共鳴型」は、結合部分のみに注目すれば電磁誘導そのものである。一方、いわゆる「共鳴型」の本質は、共役影像インピーダンス整合による受電電力の最大化にあるといえる。従って、「自己共振を用いた無線電力伝送」は共鳴型に属す

るが、そのことを以て「共鳴型は電磁誘導を用いている」と言うことはできない。

4. まとめ

いわゆる「共鳴型」と呼ばれる無線電力伝送の原理を、結合と共振の観点から明らかにした。

「共振器」とは、結合に寄与する素子（コイル・アンテナ等）と、寄与しない素子（キャパシタ等）に分けて考えることが必要であり、 k や Q について議論するときは、そのどちらに対して定義されたものであるかを認識することが必要である。

「共鳴型」の本質は共役影像インピーダンス整合を用いた受電電力最大化にある。結合機構としては電界と磁界のどちらか又は両方が用いられる。磁界のみを用いた場合、結合機構そのものは電磁誘導と同一である。一方、自己共振素子を用いた場合、磁界だけでなく電界の寄与も無視できなくなる。

文 献

- [1] A. Karalis, J. Joannopoulos, M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, 323, pp. 34-48, Apr. 2007.
- [2] 平山裕, 菊間信良, 榊原久二男, "電界結合と磁界結合から見た結合共振型無線電力伝送", *信学技報*, vol. 114, no. 9, WPT2014-15, pp. 75-78, 2014年4月.
- [3] 大平孝, "共振回路の Q ファクタ", *MWE2012 基礎講座*, 2012年12月.
- [4] 大平孝, "高周波電力伝送系における最大効率の統一理論～「共鳴」も「結合」も用いない明快教授法～", *信学技報*, vol. 114, no. 9, WPT2014-5, pp. 23-26, Apr. 2014.
- [5] 稲垣直樹, 堀智, "共鳴方式無線接続システムの偶奇モードリアクタンス関数と影像インピーダンスに基づく特性評価", *信学論*, Vol. J94-B, No. 9, pp. 1076-1085, Sep. 2011.
- [6] Ikuo Awai, "Basic characteristics of "Magnetic resonance" wireless power transfer system excited by a 0 ohm power source," *IEICE Electronics Express*, Vol. 10 (2013) No. 21, Nov. 2013.
- [7] 栗井郁雄, "磁界/電界ハイブリッド結合 WPT システムの等価回路と伝送特性", *信学技報*, vol. 114, no. 375, WPT2014-70, pp. 35-40, 2014年12月.

著者紹介

平山裕

名古屋工業大学 工学部, 准教授,
hirayama@nitech.ac.jp