

結合共振型無線電力伝送における 負荷の状態による EMC 特性の変化

矢満田 博之[†] 平山 裕[†] 菊間 信良[†] 榊原久二男[†]

[†]名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町
E-mail: [†]hirayama_hiroshi@m.ieice.org

あらまし 結合共振型無線電力伝送の実用化のためには、近傍電磁界強度や、基本波・高調波に対する不要放射特性などの EMC 特性の評価が必要となる。また、正常に負荷が接続されている状態だけでなく、送電アンテナ単体時や、受電アンテナは存在するが無負荷のときの EMC 特性の評価も必要となる。本稿では、電磁誘導として動作する短絡型ヘリカルアンテナと、自己共振で動作する開放型ヘリカルアンテナの場合について、送電アンテナ単体時、無負荷時、50Ω負荷時の EMC 特性を評価した。その結果、送電アンテナ単体時と無負荷時は、50Ω負荷時より近傍電磁界強度が高くなること、近傍電磁界の分布そのものも変化することを明らかにした。また、不要放射も、送電アンテナ単体時と無負荷時は、50Ω負荷時より悪化することが分かった。

キーワード 無線電力伝送, 結合共振, 電界結合, 磁界結合, 近傍界, 不要放射, 高調波

Consideration of Effect of Load Impedance on Electromagnetic Field for Coupled-resonant Wireless Power Transfer

Hiroyuki YAMADA[†] Hiroshi HIRAYAMA[†] Nobuyoshi KIKUMA[†] and Kunio SAKAKIBARA[†]

[†]Nagoya Institute of Technology Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, 466-8555 Japan
E-mail: [†]hirayama_hiroshi@m.ieice.org

Abstract For practical implementation of coupled-resonant wireless power transfer, EMC assessment is necessary. In this report, near-field strength and far-field radiation power with respect to the state of a load (transmitting antenna only, with receiving antenna without a load, and with receiving antenna with a 50Ω load) is investigated. We have found that near-field strength and far-field radiation power increases when the load is not connected.

Keywords Wireless Power Transfer, Coupled Resonance, Electric-field coupling, Magnetic-field coupling, Near field, Undesired emission, Harmonics

1. まえがき

近年、携帯電話、ノートパソコンや電気自動車の充電を目的として、結合共振型無線電力伝送技術が注目を集めている[1]。電気自動車の場合は送電電力が kW オーダーとなるため、近傍における漏洩電磁界が生体に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。また、遠方界放射により、電子機器の誤動作や通信システムへの干渉が引き起こされる問題も懸念される。システム全体の効率の向上のために、電源にスイッチング技術を用いた場合、高調波の放射も無視できない問題となる。このように、無線電力伝送の実用化のためには、近傍電磁界強度、および基本波・高調波における不要放射といった EMC 特性の評価が必要となる。

無線電力伝送を実用化する際、実際には送電側と受

電側が通信を行い、受電側に必要な電力を送電側から供給することとなる。しかし、受電側の機器を突然移動した場合などは、送電側での電力供給が止まる前に受電側が存在しなくなり、送電アンテナ単体に電力が供給される状態になる場合があることが予想される。また、受電側が存在していても、突然、電源スイッチを開いたり、コネクタを抜いた場合は、無負荷の状態です送電アンテナに電力が供給される状態になる場合が想定される。そのため、負荷が接続された状態だけでなく、送電アンテナ単体時、および受電アンテナは存在するが無負荷の状態における EMC 特性の評価が必要となる。

また、結合共振型無線電力伝送には、電磁誘導を用いた方式や、自己共振アンテナを用いた方式など、多

	結合機構		共振機構	整合機構 (給電機構)	具体的イメージ
	電界結合	磁界結合			
静電誘導型	あり	なし	力率補償のしくみが共振機構とみなせる場合もあるが、伝送距離の変動に対して積極的に追従せず	ある場合もあるが、負荷インピーダンスの変動に対して積極的に追従せず	
電磁誘導型	なし	あり	結合機構にリアクタンス素子を接続することにより共振	伝送距離や負荷インピーダンスの変動に対して、積極的に整合回路のパラメータや、使用周波数を追従させる	
静電誘導を用いた結合共振型	支配的	小さい(無視できる)	結合機構単独で共振		
電磁誘導を用いた結合共振型	小さい(無視できる)	支配的			
自己共振を用いた結合共振型(電界主結合)	支配的	小さいが、影響あり	結合機構単独で共振		
自己共振を用いた結合共振型(磁界主結合)	小さいが、影響あり	支配的			
電波型	遠方界で結合。空間中の電界と磁界の大きさの比は377Ω		送受それぞれ独立して共振	送受それぞれ独立して整合	

図1 代表的な無線電力伝送の実現方法

様な実現方法がある。本稿では、まず、電界結合と磁界結合の観点から、無線電力伝送方式を整理する。その上で、電磁誘導の原理で動作する短絡型ヘリカルアンテナと、自己共振で動作する開放型ヘリカルアンテナについて、負荷の状態による EMC 特性の変化を検討する。

2章では、電磁界の観点から、無線電力伝送方式の分類を行う。3章では、負荷の状態の変化による近傍電磁界の変化について検討を行う。4章では、負荷の状態の変化による、高調波を含む不要放射特性について検討を行う。5章で全体を総括する。

2. 結合共振型無線電力伝送の、電界結合と磁界結合から見た分類

結合共振型無線電力伝送技術には、コイルをトランスとして扱え、磁界だけを考慮すれば良い方法や、自己共振アンテナを用いたものなど、様々な方式がある。結合機構・共振機構・整合機構の観点からの無線電力伝送方式の分類を図1に示す[2]。従来型の静電誘導型・電磁誘導型は電界結合と磁界結合のどちらかのみを用い、共振機構は持たない。従来型の静電誘導型・電磁誘導型に、共役影響インピーダンス整合を行い、力率最大化と受電電力最大化を図った場合、結果として結合共振型として動作する。この場合においても、空間伝送のみに着目すれば静電誘導・電磁誘導と同じであり、電界結合と磁界結合のどちらかのみが支配的となる。一方、自己共振アンテナを用いる場合、空間中に蓄積される電氣的エネルギーと磁氣的エネルギーが等しくなる周波数で共振が起こる。そのため、電界

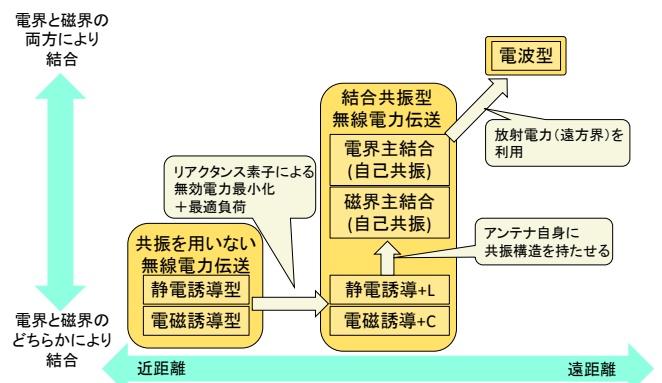


図2 代表的な無線電力伝送方式とその関係

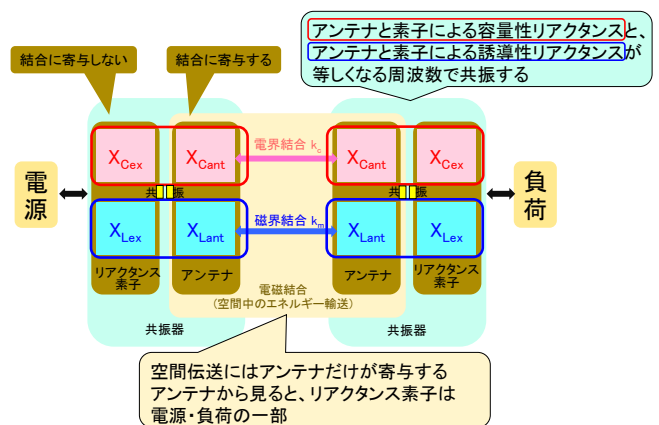


図3 結合と共振のメカニズム

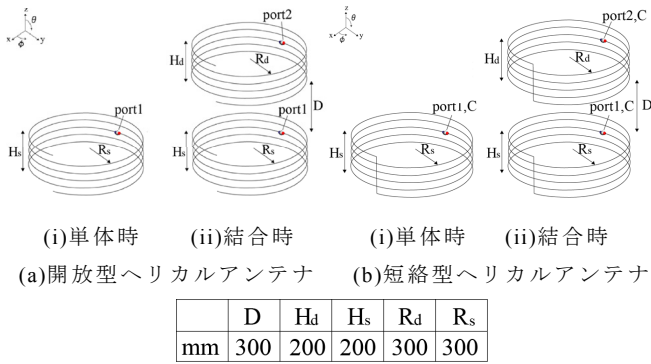


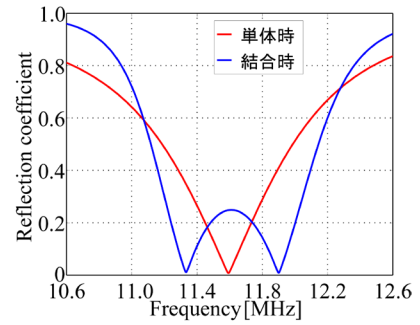
図4 解析モデル

と磁界の両方が開空間に存在し、この両方が結合に寄与することになるが、アンテナの構造により、電界結合か磁界結合かのどちらかがより支配的となる。遠方界を用いた電波型の場合は、電界と磁界の両方に等しくエネルギーが分配されて伝送されることになる。電界結合と磁界結合の観点からこれらの方式の関係を整理したものを図2に示す。

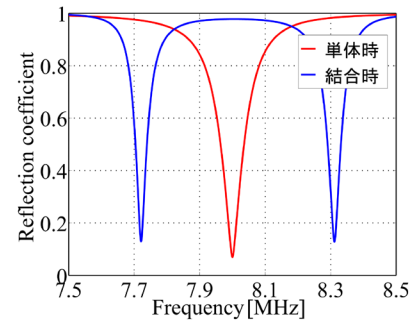
このように、一言に「結合共振型」といってもいくつかの方式があるが、これらを統一的に説明するためのモデルを図3に示す。まず、「結合機構」と「共振機構」に分けて考える。結合機構は、開空間に電磁界を放出する部分であり、結合コイルや自己共振アンテナが対応する(ここでは、これを広義のアンテナと呼ぶ)。アンテナは容量性成分 X_{Cant} と誘導性成分 X_{Lant} を持っており、送受電アンテナ間が電界結合係数 k_c と磁界結合係数 k_m により結合している。共振機構は、リアクタンス素子とアンテナから構成されている。リアクタンス素子は容量性成分 X_{Cex} と誘導性成分 X_{Lex} を持っているが、これらは電磁界を開空間に放出せず、結合には寄与しない。共振周波数は、リアクタンス素子とアンテナの容量性成分、およびリアクタンス素子とアンテナの誘導性成分が等しくなる周波数となる。共振時、系全体の電氣的蓄積エネルギーと磁氣的蓄積エネルギーは等しくなるが、開空間中の電氣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とは限らない。このようなモデルを用いることにより、自己共振型も、電磁誘導を用いた共振型も、統一的に説明することができる。具体例は次章で説明する。

3. 解析モデル

本報告で用いた解析モデルを図4に示す[3]。半径300mm、高さ200mm、巻き数5の開放型及び短絡型ヘリカルアンテナである。導線には、導電率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/mの銅を用いた。



(a)開放型



(b)短絡型

図5 反射係数の周波数特性

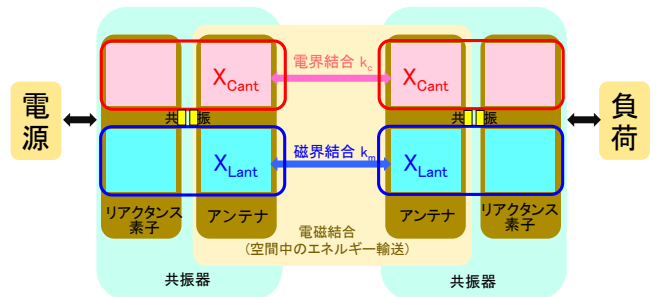


図6 開放型モデル

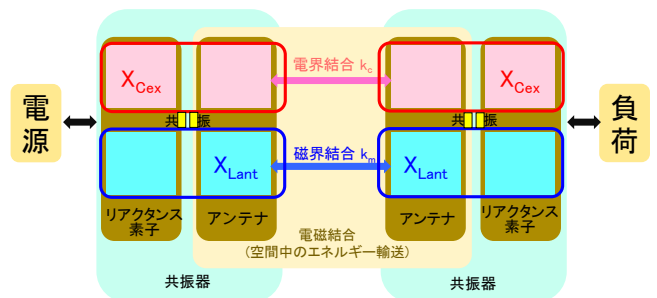


図7 短絡型モデル

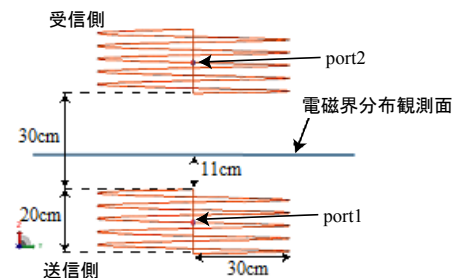


図8 中心軸を含む断面図

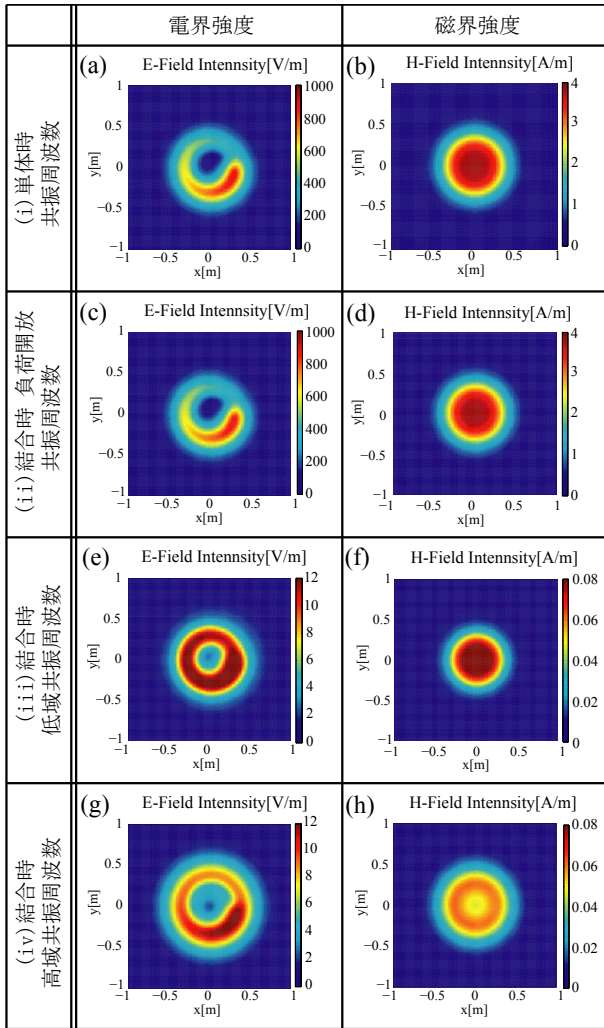


図 9 開放型ヘリカルアンテナの近傍界電磁界

開放型ヘリカルアンテナは 11.6MHz で自己共振する。短絡型ヘリカルアンテナは自己共振しないため、8MHz で共振するように 7.174pF のキャパシタを各ポートに直列に接続した。両モデルともに、port1 には出力インピーダンス $Z_0=0\Omega$ 、波高値 1V の電圧源、port2 には負荷 Z_1 を接続した。 Z_1 は ∞ または 50Ω に変化させた。

図 5 に開放型及び短絡型ヘリカルアンテナの単体時および結合時の反射係数の周波数特性を示す。結合時における低域共振周波数及び高域共振周波数は開放型ヘリカルアンテナではそれぞれ 11.3MHz と 11.9MHz であり、短絡型ヘリカルアンテナではそれぞれ 7.72MHz と 8.31MHz である。

図 6、図 7 に開放型および短絡型ヘリカルアンテナの結合と共振のメカニズムを示す。開放型ヘリカルアンテナはアンテナ自身が持つインダクタンス成分とキャパシタンス成分の両方を持つため、開空間の結合には、磁界結合が支配的だけでなく、電界結合も影響する。一方で、短絡型ヘリカルアンテナの場合では、ア

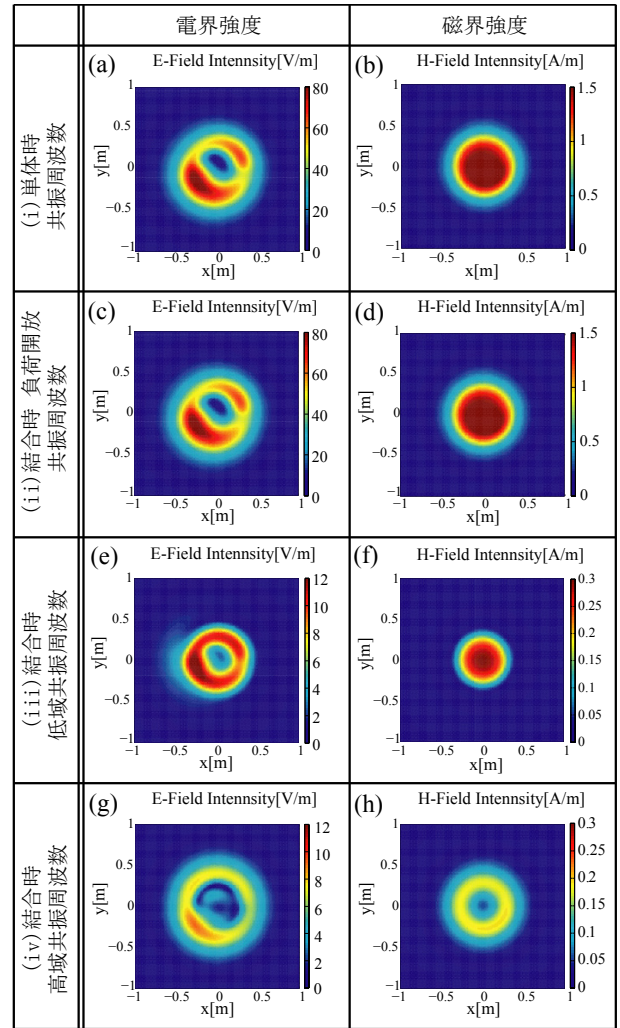


図 10 短絡型ヘリカルアンテナの近傍界電磁界

ンテナ自身はインダクタンス成分しか持たないため、開空間の電磁結合は磁界結合が支配的となる。

4. 近傍電磁界特性の検討

4.1 解析方法

単体時及び結合時 ($Z_1=\infty\Omega$) は共振周波数、結合時 ($Z_1=50\Omega$) は低域共振周波数ならびに高域共振周波数における電磁界分布をモーメント法により計算した。図 8 に示す送信コイル上面の観測面における電磁界分布を計算する。(i) 単体時に共振周波数で動作、(ii) 結合時 ($Z_1=\infty\Omega$) に共振周波数で動作、(iii) 結合時 ($Z_1=50\Omega$) に低域共振周波数で動作、(iv) 結合時 ($Z_1=50\Omega$) に高域共振周波数で動作した時の電磁界分布を開放型、短絡型それぞれ図 9,10 に示す。

4.2 受電アンテナの有無及び負荷の変化による違い

図 9(a) に示す単体時の電界強度と、図 9(c),(e) に示す結合時 ($Z_1=50\Omega$) の電界強度を比べると、結合時 ($Z_1=50\Omega$) と比べ単体時の電磁界強度が大幅に強くなるのがわかる。これは、単体時の方が無効電力が増加する

ため、電流が多く流れるためである。図 9(b)に示す単体時の磁界強度と、図 9(f), (h)に示す結合時($Z_1=50 \Omega$)の磁界強度についても同様のことがいえる。このことは、短絡型モデルについても同様のことがいえる。

一方で図 9(a),(b)に示す単体時の電界強度および磁界強度と、図 9(c),(d)に示す結合時($Z_1=\infty \Omega$)の電界強度と磁界強度を比べると、単体時と結合時($Z_1=\infty \Omega$)で変化が無い事がわかる。これは、結合時に負荷が開放されることで受電アンテナが分割され共振しないためである。このことは、短絡型モデルについても同様のことがいえる。

4.3 使用する共振モードによる違い

使用する共振モードの観点から、図 9 (f)に示す低域共振モードと、図 9 (h)に示す高域共振モードを比較すると、動作させる周波数によりコイル上面における磁界分布が大きく変わるといえる。これは強結合により低周波側および高周波側で送受信アンテナの電流位相がそれぞれ同位相および逆位相に近づくため送受信コイル間において磁界がそれぞれ強め合いと打ち消しあいを起こすためである

4.4 使用するアンテナによる違い

使用するアンテナの観点から、図 9 (a)に示す開放型ヘリカルアンテナと図 10 (a)に示す短絡型ヘリカルアンテナを比較すると、開放型モデルの電界強度が短絡型モデルに比べ強いことがわかる。これは短絡型モデルでは、開空間の電磁現象は電磁誘導だけなので電界結合が無視できるのに対し、開放型モデルでは電界結合が影響していることによるためである。また、この電界結合が影響するため、開放型モデルと短絡型モデルとでは空間インピーダンス分布が違うといえる。

5. 遠方界放射特性の検討

5.1 解析方法

共振周波数、および高調波に対する遠方界放射特性を検討するため、1MHz から 1GHz における反射電力 $|S_{11}|^2$ 、伝送電力 $|S_{21}|^2$ 、ポート 1 における進行波電力で正規化した放射電力を求めた。開放型ヘリカルアンテナにおける単体時、結合時($Z_1=\infty \Omega$)、結合時($Z_1=50 \Omega$)の結果をそれぞれ図 11 (a),(b),(c)に示す。同様に、短絡型ヘリカルアンテナにおける単体時、結合時($Z_1=\infty \Omega$)、結合時($Z_1=50 \Omega$)の結果をそれぞれ図 12 (a),(b),(c)に示す。これらの図では、ポート 1 における進行波電力に対する反射・伝送・放射電力の割合を表示している。ここでは導線には完全導体を用いたため、導体損・誘電体損は発生せず、これらの電力の合計は 100%となる。

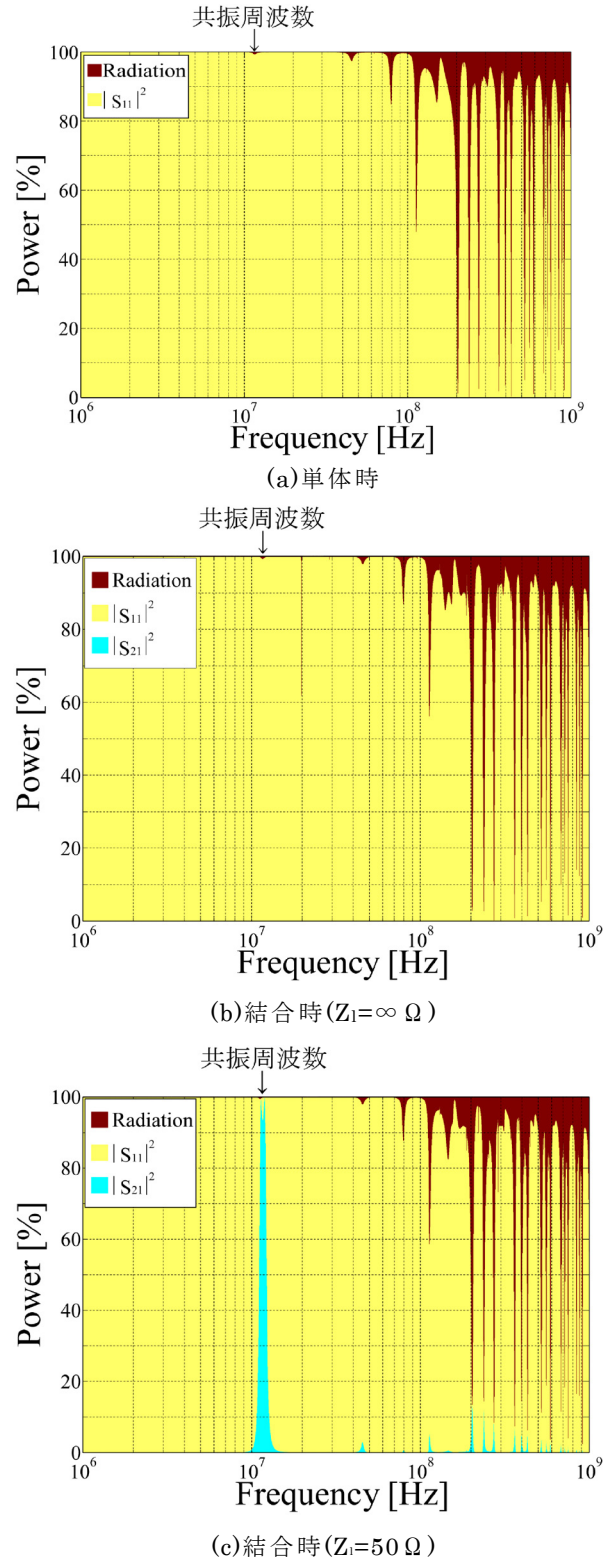


図 11 開放型ヘリカルアンテナにおける電力比

5.2 高調波に対する放射

図 11 (c), 図 12 (c)に示す、負荷が接続された状態において、共振周波数では 87%以上の電力が伝送され、放射電力は 0.9%以下となっているが、高調波に対しては最大で 97%が放射となっていることがわかる。また、

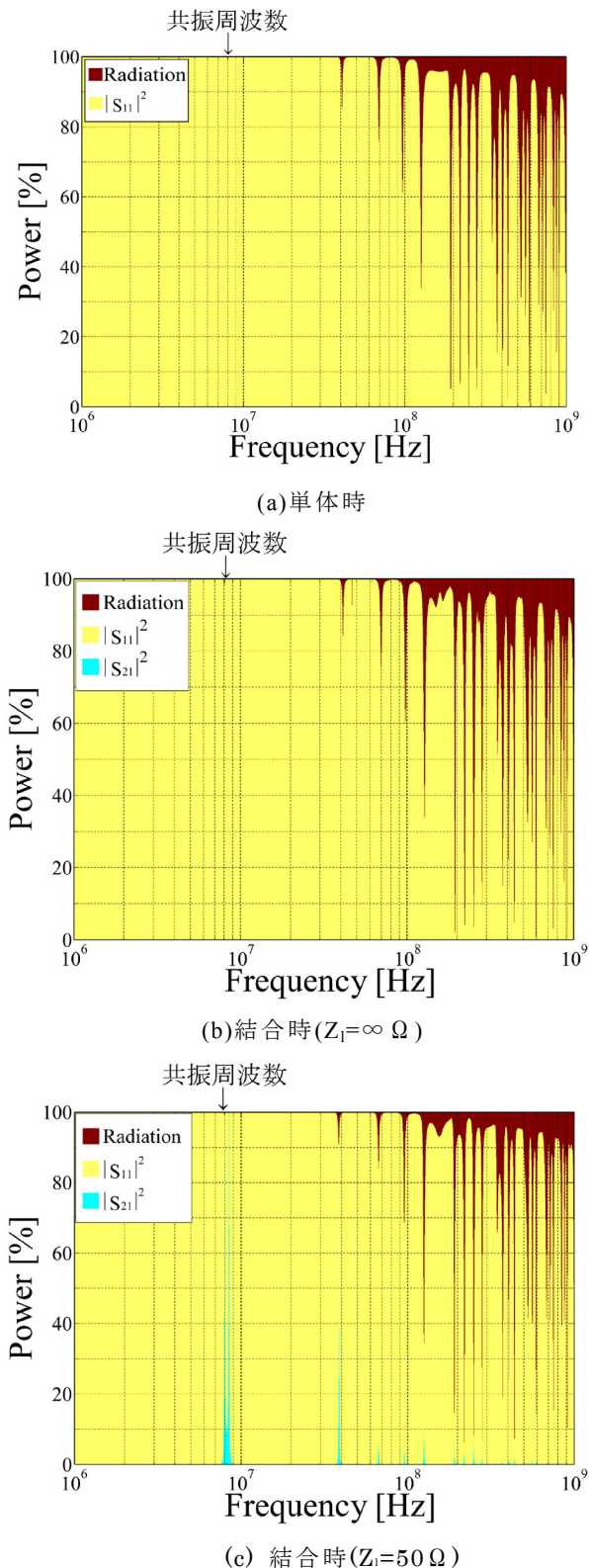


図 12 短絡型ヘリカルアンテナにおける電力比

送電アンテナ単体時や無負荷も同様、高調波に対しては放射効率が高くなっていることが分かる。このことから、スイッチング電源を用いる場合は、高調波の抑制が重要となることが分かる。

5.3 受電アンテナの有無及び負荷の変化による違い

図 11(a)に示す開放型ヘリカルアンテナ単体時の放射電力と、図 11 (c)に示す開放型ヘリカルアンテナ結合時($Z_i=50 \Omega$)の放射電力を比較すると、結合時に対して単体時の放射電力が 45MHz において 0.8dB, 79MHz において 0.8dB, 113MHz において 1.0dB 増加することがわかる。図 12(a)に示す短絡型ヘリカルアンテナ単体時の放射電力と、図 12(c)に示す短絡型ヘリカルアンテナ結合時($Z_i=50 \Omega$)の放射電力も同様に、結合時に対して単体時の放射電力が、41MHz で 2.0dB, 69MHz で 1.7dB, 97MHz で 0.9dB 増加することがわかる。このことから、単体時・無負荷時は、結合時よりも放射が多くなることが分かる。また、開放型・短絡型アンテナともに、受電アンテナが存在しても無負荷の場合は、単体時と同様の放射特性となることが分かる。

5.4 使用するアンテナによる違い

自己共振で用いる開放型アンテナとキャパシタ装荷で共振させる短絡型アンテナを比較すると、短絡型の方が、装荷素子の分蓄積エネルギーが増加するため Q 値が増加し、共振が鋭くなる[3]。図 11 と図 12 の比較から、遠方界放射においても短絡型の方が鋭い共振を持つことが分かる。

6. まとめ

自己共振で使用する開放型ヘリカルアンテナ、およびキャパシタ装荷により共振する短絡型ヘリカルアンテナを用いた場合の、受電アンテナの有無や負荷の状態による EMC 特性の違いに関する検討を行った。近傍界では、(1)単体時の方が電磁界強度が強くなる、(2)受電アンテナが存在しても、無負荷の場合は単体時と同様の近傍電磁界分布となる、(3)負荷の有無や共振モードにより、電磁界強度だけでなく分布も変化することが確認された。遠方界では、(1)高調波に対しては、共振周波数よりもより高い放射効率を示す、(2)単体時・無負荷時は、結合時よりも放射が多くなることが確認された。

今後は、低出力インピーダンスのスイッチング電源を用いて駆動したときの放射特性について検討していく予定である。

文 献

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science Magazine, Vol.317, No.5834, pp.83-86, Jul. 2007
- [2] 菊間信良, 平山裕, "結合共振型ワイヤレス電力伝送の基礎," 第一回アドバンスドワイヤレスシリーズ, Nov. 2013
- [3] H. Hirayama, T. Amano, N. Kikuma, K. Sakakibara, "An Investigation on Self-Resonant and Capacitor-Loaded Helical Antennas for Coupled-Resonant Wireless Power Transfer," IEICE Trans. Commun., Vol.E96-B, No.10 Oct. 2013