

巻きピッチが異なる逆巻型 Dual-Spiral 共振器を用いた 共振器結合型無線電力伝送システムの角度ずれによる伝送効率の比較

Comparative Study on Transmission Efficiency by Angular Misalignment for Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System using Reversed-Winding Dual-Spiral Resonator with Different Winding Pitches

富田 智士[†]
Satoshi TOMITA

石灘 真大[†]
Manato ISHINADA

田中 蒼竜^{††}
Sotatsu TANAKA

堀田 昌志[†]
Masashi HOTTA

[†]山口大学大学院創成科学研究科

^{††}山口大学工学部

1. まえがき

近年、電気自動車や産業用ロボット等への応用を背景に非接触で電力を供給できる無線電力伝送 (Wireless Power Transfer: WPT) 技術への関心が高まっている。従来の有線給電方式は、ケーブルの取り回しや接点劣化といった課題を抱えており、安全性や信頼性の観点から非接触給電方式の導入が期待されている。その中でも、共振器結合型無線電力伝送 (Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer: RC-WPT) 方式は、数十 cm～数 m といった中距離において高効率な電力伝送が可能であり、送・受電ユニット間での位置ずれや角度ずれに対して強い特性を持ち、有望な方式として注目を集めている[1]-[7]。

しかしながら、RC-WPT システムにおいても送・受電ユニット間に相対的な角度ずれが生じると、電力伝送効率が低下することが報告されている。この問題は、実際の応用環境において不可欠であり、効率の安定化を図る上で解決すべき重要な課題である。そこで当研究室では2種類のスパイラル共振器を同一平面上に組み合わせた Dual-Spiral 共振器を提案し、電界分布や磁界分布の制御による効率改善を検討してきた。特に、2種類のスパイラル共振器の巻き方向を逆とした逆巻型 Dual-Spiral 共振器は、角度ずれが存在する場合においても効率の低下を抑制できることを示された[8]-[11]。

これまで、角度ずれにおいて巻きピッチの違いが電力伝送効率に与える影響を比較・評価した研究は十分ではない。角度ずれが存在しない場合には、巻きピッチが変化すると、共振器の分布インダクタンスや静電容量が変化し、これに伴って結合係数や電磁界分布が変わることが知られている[12]。一方で、角度ずれが存在する場合には、電磁界分布の変化により磁束の交差量や結合度が変化し、その結果として電力伝送効率が低下する。さらに適切な位置ずれを与えることで磁力線の入射方向を補正でき、効

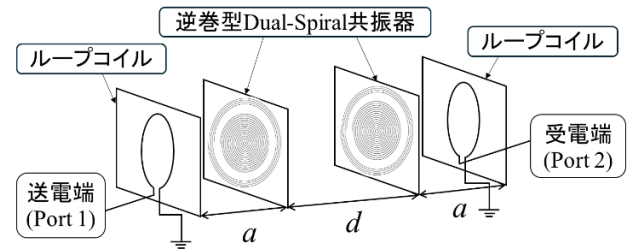


図 1 RC-WPT システムの構成図

率低下を抑制できる[11],[13]。したがって、本研究では、5 および 7 mm ピッチの逆巻型 Dual-Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムにおいて、送・受電ユニット間に角度ずれが存在する場合の電力伝送効率特性を評価する。

2. RC-WPT システムの構成

本研究で取り扱う RC-WPT システムの構造を図 1 に示す。同システムでは、送・受電用のループコイルとスパイラル共振器から構成されている。そして、ループコイルとスパイラル共振器間距離を a [cm]、送・受電ユニットのスパイラル共振器間距離を d [cm] とし、送電用のループコイル、スパイラル共振器、受電用のスパイラル共振器、ループコイルの順にすべての中心が一直線上となるように配置している。

ここで、ループコイルは 1 mm 径の銅線 (2UEW) を用い、直径 17.5 mm の 1 ターンループ形状を構成した。

次に、スパイラル共振器については、1 mm 幅のス

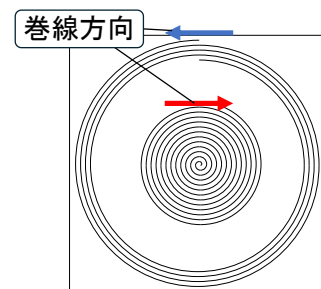


図 2 逆巻型 Dual-Spiral 共振器

パイラル形状溝を厚さ 2 mm のポリエチレン(PE)板上に掘ったスパイラルガイドに、1 mm 径の銅線 (2UEW) をはめ込むことで構成した。

本研究で用いた逆巻型 Dual-Spiral 共振器の外形を図 2 に示す。試作した共振器は巻きピッチを 5 および 7 mm としたものであり、外径および共振周波数は双方共に 41.6 cm および 10.0 MHz としている。これらを用いて、巻きピッチの違いが角度ずれ条件下での電力伝送効率に与える影響を比較した。

3. 角度ずれを有する WPT システムの位置ずれによる電力伝送効率改善

本 RC-WPT システムでは、送電ユニット側のループコイルからの磁力線が受電ユニット側のループコイルに垂直入射するとき電力伝送効率は最大となる。また、角度ずれが生じると、磁力線は斜めに入射す

るため、受電コイルを通過する磁力線の量が減少し、電力伝送効率が低下する。そこで、角度ずれが生じている受電コイルに対して磁力線が垂直に入射するように意図的に位置ずれを起こすことで電力伝送効率を改善することができると考えられている。先行研究において、逆巻型 Dual-Spiral 共振器においても、位置ずれを利用した改善効果は有効であることが報

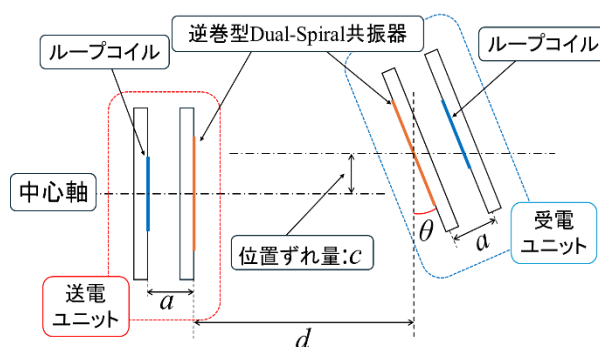


図 3 測定系

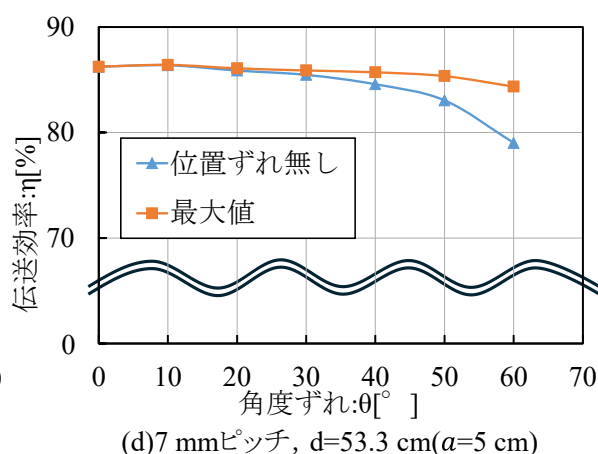
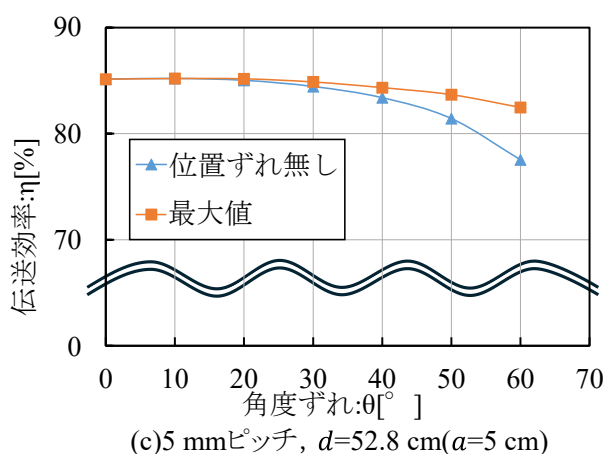
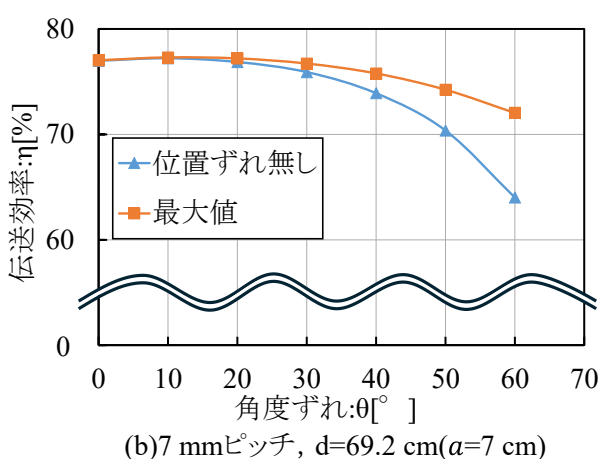
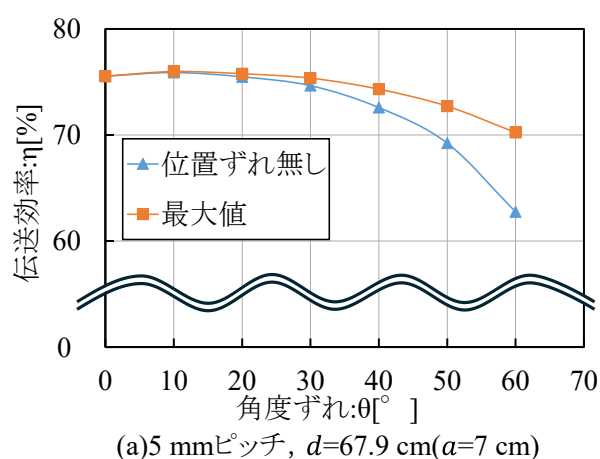


図 4 位置ずれにおける電力伝送効率の変化

告されている[11],[13]. 本研究では, 逆巻型 Dual-Spiral 共振器の巻きピッチを変化させた場合, 角度ずれ条件下での電力伝送効率改善特性がどのように変化するかを検討した. 図3に測定系を示す. 測定方法として, 受電ユニットをスパイラル共振器の中心軸を基準として配置し, 角度ずれ θ を 0° から 60° まで 10° 刻みで付与した. それぞれの角度条件において, 受電ユニットを軸方向に移動させ, 位置ずれ量 c を 0 cm から 20.0 cm まで 1.0 cm 刻みで変化させ, その際の電力伝送効率 η を測定し, 効率の変化を記録した. ここでの電力伝送効率 η は振幅反射係数 $|S_{11}|$ および振幅透過係数 $|S_{21}|$ の最大値より以下の式を用いて算出した.

$$\eta[\%] = \frac{10^{-\frac{|S_{21}|}{10}}}{1 - 10^{-\frac{|S_{11}|}{10}}} \times 100$$

ここで, 角度ずれと位置ずれがない場合において, a と d はシステムの整合条件を満たすように調整した[14]. また, 得られたデータに対し, 各角度ずれ θ における位置ずれ無し($c = 0\text{ cm}$)の効率と, 位置ずれによって効率が最大となった値を最大値として比較した. さらに, 改善の度合いを示す指標として以下の式で定義される改善率[%]を算出した.

$$\frac{\text{最大値の効率} - \text{位置ずれ無しの効率}}{\text{位置ずれ無しの効率}} \times 100$$

測定結果を図4に, 位置ずれ無しと最大値の電力伝送効率およびその改善率を表1に示す.

本結果より, θ が小さい範囲($\theta=0^\circ\sim30^\circ$)では, 位置ずれ無しの効率は高い値を維持し, 位置ずれを導入しても効率の改善はわずかであった. 一方, θ が小さい範囲($\theta=40^\circ\sim60^\circ$)では位置ずれ導入の効果が顕著に現れ, 効率が大きく改善した. また, 角度ずれが大きくなるにつれて位置ずれによる効率改善効果はより顕著になることが確認された.

さらに, 5 および 7 mm ピッチの比較において, a が異なる際においても改善率の角度変化に応じた特性は双方でほぼ同一の傾向を示した.

表 1 電力伝送効率の改善率

(a)5 mm ピッチ, $d=67.9\text{ cm}(a=7\text{ cm})$

位置ずれ無し		最大値		改善率 [%]
$\theta[^\circ]$	$\eta[\%]$	$c[\text{cm}]$	$\eta[\%]$	
0	75.55	0.0	75.55	0.000
10	75.90	3.0	75.99	0.126
20	75.49	7.0	75.78	0.387
30	74.66	7.0	75.37	0.951
40	72.59	11.0	74.37	2.389
50	69.23	13.0	72.72	5.039
60	62.75	18.0	70.24	11.94

(b)7 mm ピッチ, $d=69.2\text{ cm}(a=7\text{ cm})$

位置ずれ無し		最大値		改善率 [%]
$\theta[^\circ]$	$\eta[\%]$	$c[\text{cm}]$	$\eta[\%]$	
0	76.99	1.0	77.03	0.053
10	77.22	2.0	77.30	0.100
20	76.87	6.0	77.21	0.442
30	75.91	9.0	76.72	1.066
40	73.90	11.0	75.78	2.544
50	70.37	15.0	74.24	5.501
60	64.00	19.0	72.04	12.55

(c)5 mm ピッチ, $d=52.8\text{ cm}(a=5\text{ cm})$

位置ずれ無し		最大値		改善率 [%]
$\theta[^\circ]$	$\eta[\%]$	$c[\text{cm}]$	$\eta[\%]$	
0	85.14	0.0	85.14	0.000
10	85.20	0.0	85.20	0.000
20	85.03	5.0	85.18	0.175
30	84.45	6.0	84.88	0.512
40	83.39	8.0	84.34	1.143
50	81.42	12.0	83.68	2.770
60	77.54	14.0	82.47	6.365

(c)7 mm ピッチ, $d=53.3\text{ cm}(a=5\text{ cm})$

位置ずれ無し		最大値		改善率 [%]
$\theta[^\circ]$	$\eta[\%]$	$c[\text{cm}]$	$\eta[\%]$	
0	86.24	0.0	86.24	0.000
10	86.37	2.0	86.41	0.046
20	85.87	6.0	86.08	0.248
30	85.46	7.0	85.88	0.494
40	84.57	10.0	85.71	1.347
50	83.04	12.0	85.35	2.783
60	79.00	16.0	84.35	6.771

4. あとがき

本研究では、巻きピッチが異なる逆巻型 Dual-Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムにおいて、角度ずれ条件下での電力伝送効率を実験的に評価した。その結果、巻きピッチを 5 および 7 mm とした場合の双方ともに、改善率の角度ずれ量依存性に大きな差は見られなかった。

今後の検討課題としては、本研究で用いた逆巻型 Dual-Spiral 共振器間に損失性媒質として水道水や海水などの導電率をもった物質が介在する場合の角度ずれによる電力伝送効率の比較について検討していきたい。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究 (C) 23K03818 の助成の下に実施されたものである。

参考文献

- [1] 「無線給電が実現する未来の可能性に世界と日本はどう取り組む？ 人体への影響や距離の課題も -HATCH | 自然電力メディア」, HATCH (https://shizen-hatch.net/2021/05/18/wireless_power_supply/)
- [2] 栗井郁雄, “共鳴型ワイヤレス電力伝送の新しい理論,” 電気学会論文誌 C 分冊, 130 巻, 6 号, pp.966-971, 2010.
- [3] 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 栗井郁雄, “共鳴型無線給電システムの伝送効率改善に関する検討,” 第 13 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (広島) 論文集, no.B-3, pp.220-223, 2011.
- [4] 栗井郁雄, “磁気結合共振器型ワイヤレス給電システムの BPF 理論による設計法,” 電気学会論文誌 C 分冊, 130 巻, 12 号, pp.2192-2197, 2010.
- [5] 栗井郁雄, 小森琢也, 石田哲也, 石崎俊雄, “共鳴型ワイヤレス電力伝送に用いる共振器の比較検討,” 電子情報通信学会技術報告 (無線電力伝送), no.WPT2010-01, pp.1-7, 2010-04.
- [6] 篠原真毅, 電界磁界結合型ワイヤレス給電技術-電磁誘導・共鳴送電の理論と応用, pp.290-299, 科学情報出版株式会社, 2014.
- [7] A.Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” *SIENCE*, vol.317, pp.83-86, 2007.
- [8] Nur Syafiera Azreen Binti Norodin, “Study on Performance Improvement of Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System Using Spiral Resonators Towards Practical Use,” *Doctoral Thesis on Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University*, pp.17-50, 2022-03.
- [9] X. Duan, K. Harada, H. Onari, and M. Hotta, “Fundamental Characteristics of Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System By Using Planar Type Dual-Spiral Resonators,” *Proc. the 19th IEEE Hiroshima Section Student Symposium* (Matsue, Japan), no.A1-7, pp.17-20, 2017-12.
- [10] 石川潤一郎, 堀田昌志, “デュアルスパイラル共振器を用いた角度ずれを有する共振器結合型無線電力伝送システムに対する純水の影響に関する研究,” 第 24 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (岡山) 論文集, no.TP-C-4, pp.130-133, 2022-11.
- [11] 安達天哉, 石灘真人, 富田智士, 堀田昌志, “逆巻型 Dual-Spiral 共振器を用いた共振器結合型無線電力伝送システムの角度ずれによる伝送効率低下の改善法,” 第 26 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (広島) 論文集, no.TP-B-6, pp.173-177, 2024-11.
- [12] 島津裕香, 山田大貴, 堀田昌志, “線間距離 7 mm のスパイラルガイドを用いた無線給電システム用 Dual-Spiral 共振器の作成指針に関する検討,” 第 26 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (広島) 論文集, no.TP-A-5, pp.15-19, 2024-11.
- [13] 堀内賢太, 藤本悠之介, 力石一輝, 島津裕香, 堀田昌志, “キャパシタ装荷スパイラル共振器を用いた角度ずれを有する共振器結合型無線電力伝送システムの電力伝送効率の改善に関する研究,” 第 25 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (島根) 論文集, no.TP-A-6, pp.22-26, 2023-11.
- [14] 力石一輝, 穴田怜旺那, 前川陽哉, 堀田昌志, “外径が異なるスパイラル共振器を含む共振器結合型無線電力伝送システムの基本特性に関する研究,” 第 26 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (広島) 論文集, no.TP-B-5, pp.168-172, 2024-11.