

地上側コイルアレーにおける 垂直磁束と水平磁束を利用した受電電力向上の基礎検討

学生員 米田 光佑 正 員 居村 岳広 フェロー 堀 洋一

Basic study of power receiving power enhancement using vertical and horizontal magnetic fluxes in ground-side coil arrays.

Kosuke Yoneda, Student Member, Takehiro Imura, Member,
Yoichi Hori, Fellow (Tokyo University of Science)

In recent years, electric vehicles have attracted a lot of attention, of which wireless power transfer during driving has been actively studied. However, as the number and length of power transfer coils are limited, it is required to stably receive more power in the limited power feeding section. In this study, a new method is proposed for DWPT systems, in which the horizontal and vertical fluxes are received by switching the receiver coils in order to get power over the entire feeding section. As a result, it is verified that the proposed method produces the highest amount of power compared to the other eight combinations of coil connecting methods assumed in the simulation.

キーワード：ワイヤレス給電, 走行中ワイヤレス給電, 垂直磁束, 水平磁束

Keywords : wireless power transfer, dynamic wireless power transfer, Vertical magnetic flux, Horizontal magnetic flux

1. 序論

カーボンニュートラルを達成するために、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) が注目を集めている。しかし、電気自動車は充電時間の長さやバッテリーの寿命、バッテリーのコストなどが問題視されている。その問題に対して、走行中ワイヤレス給電 (DWPT: Dynamic Wireless Power Transfer) の研究が盛んに行われている。走行中ワイヤレス給電は、道路に埋設されている送電コイル(一次側)から自動車に搭載されている受電コイル(二次側)に向けてワイヤレスで給電しバッテリーを充電するというものである。DWPT が実用化されれば、航続距離の延長、バッテリーの小型化による車体の軽量化期待できる。しかし、DWPT の実用化には様々な課題があり、そのうちのひとつとして受電電力の問題が挙げられる。DWPT では道路に敷設されている送電コイルから電力を受け取る。しかし、送電コイルの個数や長さに限りがあるため、その限られた給電区間で安定的により多くの電力を受け取ることが求められる。先行研究では、送電コイル間の粗結合を改善するために、二次側にマルチコイルを用いて、送電コイルの通電方法を工夫することで垂直磁束と水平磁束を発生させ給電区間全体で安定した電力を伝送する方法⁽¹⁾が検討されているが、マルチコイルは

コンポーネント数が増えるため最適なコイル形状とは言えない。そこで、本研究では DWPT のシステムにおいて、受電コイルを切り替えることで水平磁束と垂直磁束を受け取り、給電区間全体で電力を受け取る新たな手法を提案する。提案する手法は電磁界シミュレーションにより検証する。

2. 研究概要

〈2・1〉 DWPT について 本研究を行うにあたって想定した走行中ワイヤレス給電システムを Fig.1 に示す。DWPT には道路に埋設された n 個の送電コイルから車に搭載された受電コイルにワイヤレス給電を行う。



Fig. 1. DWPT のイメージ図

〈2・2〉 想定している DWPT システム 本研究では Fig.1 のような乗用車向けの DWPT について検討する。DWPT には磁界共振結合方式が広く利用されている。また、磁界共振結合方式で用いるコイルについては様々な形状が研究されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が、コストの観点から長方形コイル(CR コイル : Circular Rectangular coil)とダブル D コイル(DD コイル : Double D coil)について検討する。

〈2・3〉 コイル形状における磁束特性 Fig.2,3 に CR コイル、DD コイルの構造と磁束を示す。Fig.2,3 に示すように、CR コイルは垂直磁束を、DD コイルは水平磁束を結合するように設計されている。つまり、CR コイルは水平磁束を結合できず、DD コイルは垂直磁束が結合できないことがわかる。

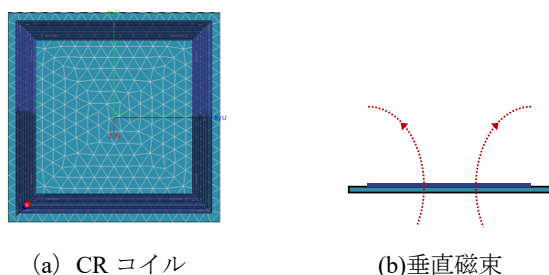


Fig. 2. CR コイルの構造と磁束

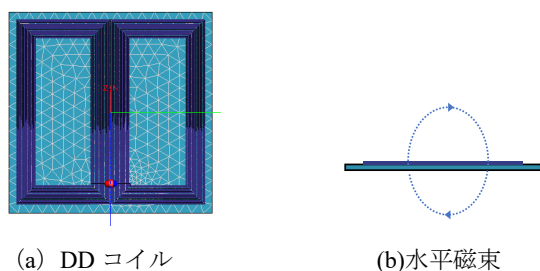
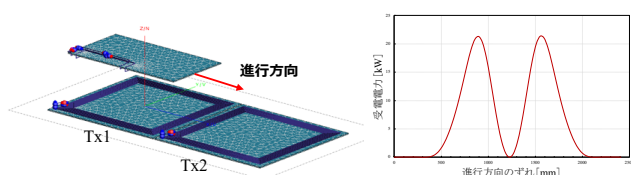
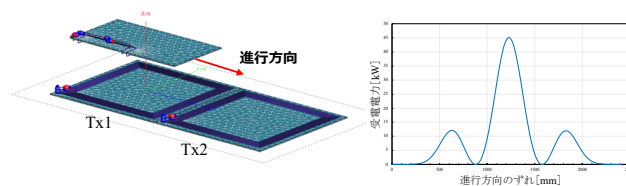


Fig. 3. DD コイルの構造と磁束

〈2・4〉 送電コイルが複数時の受電電力特性 Fig.4 に送電コイル2個、受電コイル1個の場合の受電電力のイメージ図を示す。隣り合う送電コイルの電圧の位相差は逆位相である。また、受電コイルの形状はFig.4はCR コイル、Fig.5はDD コイルである。Fig.4 に示すように、CR コイルは水平磁束が発生している区間では電力が急激に落ち、DD コイルでは垂直磁束が発生している区間では電力が急激に落ちていることがわかる。



(a)送電コイル(CR)-受電コイル(CR)の受電電力
(Table 1. ⑤に相当)



(b)送電コイル(CR)-受電コイル(DD)の受電電力
(Table 1. ⑥に相当)

Fig. 4. 各コイルにおける受電電力のイメージ

3. 提案手法

〈3・1〉 提案手法概要 Fig.5 に提案手法で用いる送受電コイルを示す。Fig.4 に示した Tx1 と Tx2 間の受電電力が減少する問題に対し、送電側では送電コイル上で垂直磁束、Tx1 と Tx2 間で水平磁束を生成させる。また、受電側では送電コイル上に来た時は CR コイル、Tx1,Tx2 間では DD コイルにすることで給電区間全体に受電電力を受け取ることができる。

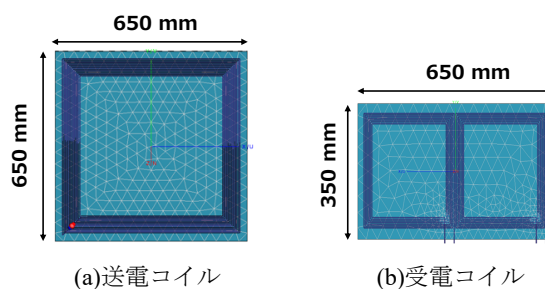


Fig. 5. 提案手法に用いるコイル形状

〈3・2〉 送電側システム Fig.5 に送電側のシステムを示す。送電コイルの形状は CR コイルである。送電側のシステムの目的としては Tx1 と Tx2 の間の水平磁束を強めることである。その方法として、隣り合う送電コイルの電圧を逆位相で印加することで送電コイルに向かう水平磁束が強め合う。

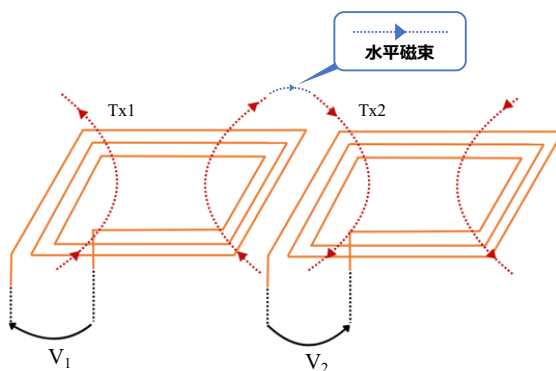


Fig. 6. 送電側システムのイメージ

〈3・2〉 受電側システム Fig.6 より、Tx1,Tx2の間では水平磁束が発生し、Tx1,Tx2 上では垂直磁束が発生している。そのため、受電コイルを垂直磁束と水平磁束を受け取れるコイル形状にする必要がある。よって、本研究で提案する形状は Fig.5 の受電コイルにスイッチをつけ、そのON,OFFによってコイル形状をCR コイル、DD コイルにスイッチで切り替えられる構成にした。

①受電コイルが Tx1 と Tx2 の間に来た時 (HF mode)

Fig.7 に①の時のシステム全体のイメージ図を示す。Fig.7の時、SW3,4 を導通させることで受電コイルが DD コイルモード(以降、HF mode : Horizontal Flux mode と呼称する)になり、Tx1、Tx2 から発生する水平磁束と結合する。

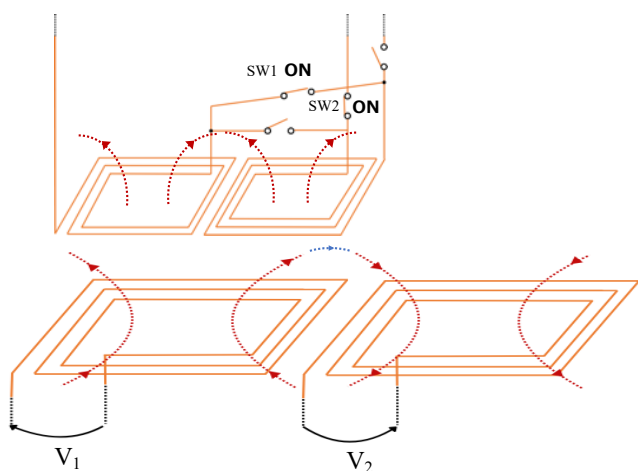


Fig. 7. 受電コイルが Tx1 と Tx2 の間に来た時 (HF mode)

②受電コイルが Tx1 と Tx2 の直上に来た時 (VF mode)

Fig.8 に②の時のシステム全体のイメージ図を示す。Fig.8の時、SW1,2 を導通させることで受電コイルが CR コイルモード(以降、VF mode : Vertical Flux mode と呼称する)になり、Tx1、Tx2 から発生する垂直磁束と結合する。

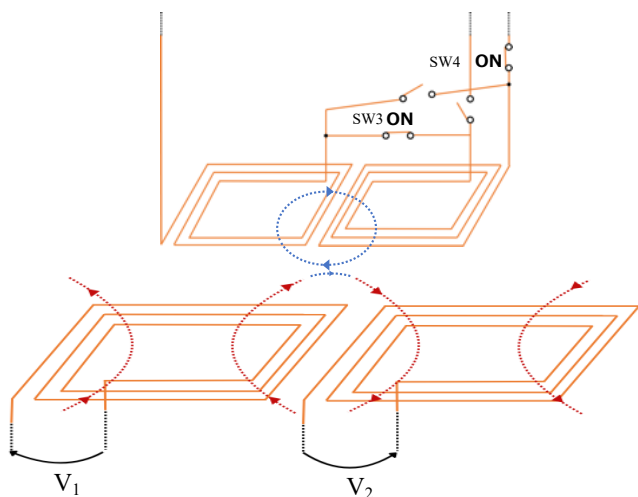


Fig. 8. 受電コイルが Tx1 と Tx2 の直上に来た時 (VF mode)

4. シミュレーション概要

提案手法の有用性を検証するために(i)送電コイル形状(CR コイル or DD コイル)、(ii)隣接する送電コイルの電圧の位相差(同位相 or 逆位相)、(iii)受電コイルのモードの切り替え(HF mode or VF mode)をそれぞれ変えた時の電力量を比較検討する。Fig.10,11 に本研究で比較検討したパターンを示す。また、提案手法である⑤と⑥は受電電力が最大になる点で切り替えると仮定し、電力量を計算した。①,②,③,④,⑦,⑧は各 mode で電力量を計算した。

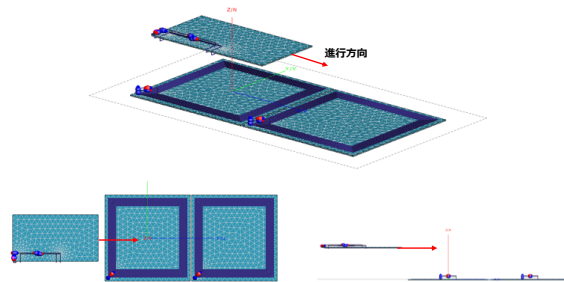


Fig. 9. シミュレーション全体図

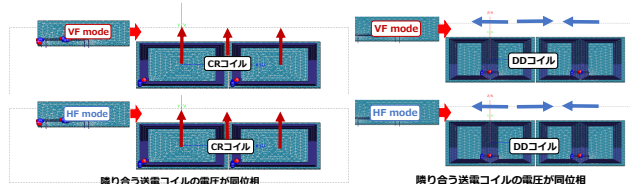


Fig. 10. パターン①(左上)-パターン②(左下)
パターン③(右上)-パターン④(右下)

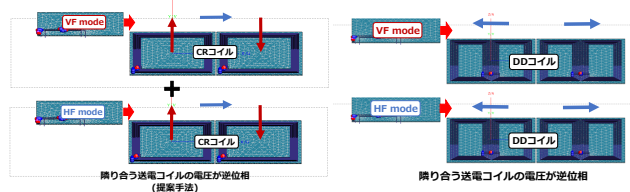


Fig. 11. パターン⑤(左上)-パターン⑥(左下)(提案手法)
パターン⑦(右上)-パターン⑧(右下)

また、以下に Fig.10,11 のパターンをまとめたものを Table.1 に示す。

Table 1. 比較検討したパターン

	送電コイル形状(CR コイル)	送電コイル形状 (DD コイル)
隣接する送電 コイルの電圧 位相(同位相)	① 受電(VF mode)	③ 受電(VF mode)
	② 受電(HF mode)	④ 受電(HF mode)
隣接する送電 コイルの電圧 位相(逆位相)	受電(⑤VF mode+⑥ HF mode(提案手法))	⑦ 受電(VF mode)
		⑧ 受電(HF mode)

5. シミュレーション

〈5・1〉 FEKO の解析モデル 今回、Hyper Works 社の製品である CEM ソフトウェア FEKO を用いてモーメント法で電磁界シミュレーションを行う。また、共振回路は LCC-LCC 方式を用いて解析を行なった。シミュレーションで用いたパラメータを Table2.に示す。

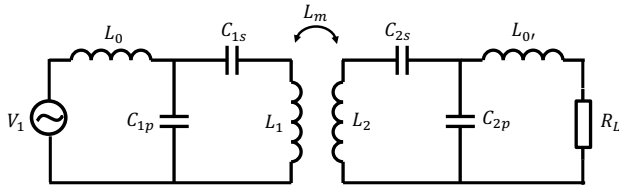


Fig. 12. LCC-LCC 回路

Table 2. 共振回路パラメータ

		Tx (CR coil)	Tx(DD coil)	Rx (VF mode)	Rx (HF mode)
Input voltage	V_1 [V]	600	600	—	—
Load resistance	R_L [Ω]	—	—	10	10
Operation frequency	f [kHz]	85	85	—	—
Compensated inductance	L_0 [μ H]	20	20	20	20
Transmitter/Receiver inductance	L_1 [μ H]	408	624	91	121
Compensated capacitor	C_p [nF]	175	175	175	175
Resonant capacitor	C_s [nF]	9.0	5.8	49.6	34.8

〈5・2〉 シミュレーション結果 Fig.13 に提案手法の受電電力の結果を示す。VF mode について着目すると、進行方向のずれ 900 mm と 1550 mm の点でピーク電力約 20 kW を受電していることがわかる。また、進行方向のずれ 1200 mm の点で受電電力が減少していることがわかる。これは 2 つの送電コイルが CR コイルであるため、送電コイル直上で垂直磁束が強くなるためである。また、隣接する送電コイルの電圧の位相差が逆位相のため進行方向のずれ 1200 mm の点 (Tx1 と Tx2 の間) では水平磁束が発生しているため VF mode とは結合できない。同様に、HF mode について着目すると、垂直磁束が強い点(900 mm と 1550 mm)で受電電力が減少していることがわかる。一方で、水平磁束が強い点(1200 mm)ではピーク電力約 45 kW を受電していることがわかる。以上より、VF mode と HF mode の特性を確認することができた。

Fig.14 にシミュレーション結果(電力量)を示す。また、電力量を計算するにあたって、受電コイルが送電コイルを時速 60km で通過すると仮定した。提案手法と他のパターンを比較するとスイッチング損失等を考慮しなければ、一番電力量が多いことがわかった。以上より、8 パターンの比較検討により提案手法の有用性があると実証できた。

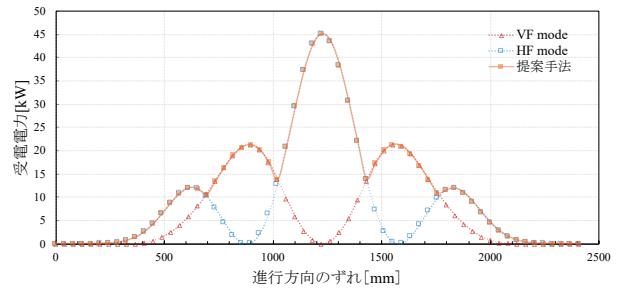


Fig. 13. 提案手法の受電電力

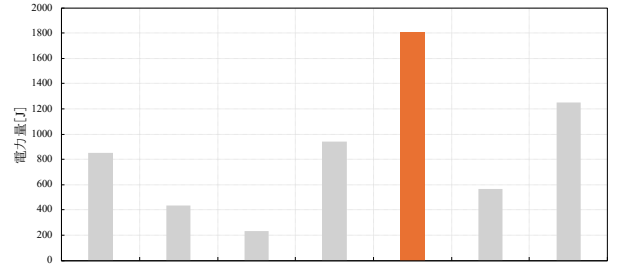


Fig. 14. シミュレーション結果(電力量)

6. まとめ

本研究では、受電コイルの接続方法を切り替えることで水平磁束と垂直磁束を受け取り、給電区間全体で電力を受け取る新たな手法を提案し、その有用性をシミュレーションによって検証した。提案手法は、送電側システムでは隣接する送電コイルの電圧の位相差を逆位相にし、受電側システムでは垂直磁束を受け取れる形状と水平磁束を受けとれる形状になるような、スイッチを利用したコイル形状を提案した。結果として、想定されるコイル形状の組み合わせ全 8 パターンに対し、提案手法が他と比較して一番電力量が多いことがわかった。

今後の課題としては、VF mode と HF mode をリアルタイムに切り替えた時のスイッチング損失等の考慮、受電コイルの切り替え手法の検討が必要である。

文 献

- (1) 宮本 曹, 太田 涼介, 星 伸一, 岡田 涼平:「地上側にコイルアレーを用いた走行中非接触給電システムの伝送電力量の向上」, 信学技報, Vol. 122, No. 443, pp. 53-57 (2023)
- (2) K. Hanawa and T. Imura, "Proposal of Ferrite-less and Capacitor-less 85 kHz Four-Layer Coil for Stationary Wireless Power Transfer," *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-5
- (3) J. Rahulkumar, R. Narayanamoorthi, Pradeep. Vishnuram, Mohit. Bajaj, Vojtech. Blazek, Lukas. Prokop and Stanislav. Misak, "An Empirical Survey on Wireless Inductive Power Pad and Resonant Magnetic Field Coupling for In-Motion EV Charging System," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 4660-4693, (2023)
- (4) K. Hanawa, T. Imura, Y. Hori and N. Abe, "Comparison of Circular Coil, Double-D Coil, and 85 kHz Self-Resonant Coil in Road Embedment for Dynamic Wireless Power Transfer," *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Brussels, Belgium, pp. 1-6(2022)