

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06208

研究課題名(和文) 磁界分布が異なる走行中非接触給電用共用化トランスの開発

研究課題名(英文) Development of common using wireless power transformer for direct charging with different magnetic field distribution

研究代表者

金子 裕良 (KANEKO, Yasuyoshi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10233892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：駐車中のEV用非接触給電と共用可能な走行中非接触給電システムを検討した。地上側の非接触部分の磁界分布が異なる場合でも給電可能な車載用Hc型コアトランスの研究開発を行った。Hc型コアトランスの最適構造や回路方式について検討し、地上側コイル方式が異なる場合の特性比較を行った。Hc型コアトランスを拡張したラダー型トランスを用いて漏洩電磁界が低減することを明らかにした。また、地上側飛び石コイルの複数接続方式(直列・並列)と補償用コンデンサ配置(SS方式、PS方式、中継コイル方式)の組合せ等について論理解析し、出力電力や入力力率の特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

駐車中でも走行中でも、磁界分布が異なる場合でも共用可能な車載側コイルの検討はワイヤレス給電の普及には必要不可欠である。駐車中非接触給電の規格はほぼ定まり、現在、走行中非接触給電の標準化が進められている。海外では日本に先行してループコイル方式や飛び石方式など様々な研究開発が行われ、車載側コイルもフレキシブルな検討がなされている。走行中給電が実用化し国際標準化される際に、本研究の成果が活用され、EV先進国の日本が規格制定に有利となるとともに、更なるEV普及による環境負荷の低減に寄与することが社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：We developed a wireless power supply system that can be shared while parking and traveling. The Hc core transformer can be coupled to a transformer having a different magnetic field distribution. We examined the optimum structure and circuit method of the Hc core transformer and confirmed its effectiveness. It has been clarified that the leakage electromagnetic field is reduced by using a ladder type transformer in which the Hc type core transformer is expanded. In addition, we analyzed the characteristics of output power and input power factor by logic analysis of combinations of multiple ground connection coils (series / parallel) and compensation capacitor arrangement (SS system, PS system, relay coil system).

研究分野：電気電子工学

キーワード：非接触給電 EV 走行中給電 磁界結合方式 ワイヤレス給電 磁界分布 共用化 中継コイル方式

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 現行 EV は一充電走行距離が 100km 前後と短く、充電のための待機時間ロスは大きな課題で、充電スタンドを増やしてもその付近の交通渋滞を引き起こす原因になる。この解決方法として期待されているのが走行中非接触給電システム(図 1)であり、主にバスなど大型車を対象として地上側にループコイルを埋設し専用の車載用コイルで受電する方式などが国外等で検討されている。また、埋設するループコイルの初期・メンテナンスコストを減らす方式として、円形コイル方式やソレノイド方式の送電パッドを複数個地上側に埋設して飛び石式に給電するなど、複数の給電方式(非接触部分のコイル形状と磁界分布)が存在している。

(2) 一方、停車中の自家用 EV 向け非接触給電の有力な方式は、周波数 80kHz 帯(81~90kHz)を使用する磁界結合(電磁誘導)方式であるが、非接触部分の給電コイル形状には磁界分布が噴水形状となる円形コイル方式とアーチ形状となるソレノイド方式が存在する。これら磁界分布が異なる方式は、コイルサイズ、ギャップ長(コイル間の空隙距離)、位置ずれ変化に伴う給電効率特性、漏洩電磁界強度などに関して一長一短あり、標準化においても両方式併記の見込みである。このため、両方式の共用化が可能な給電コイル方式の研究開発は重要で、

DD-DDQ(又は DD-BPP)や Hc 型コアトランスなど先行研究開発がある。特に、Hc 型コアトランスはコイルの直並列を切り換えるだけで両方式の磁界分布に対応でき、かつ小型化が可能で位置ずれに強い有利なソレノイド方式の特性も有している(図 2)。

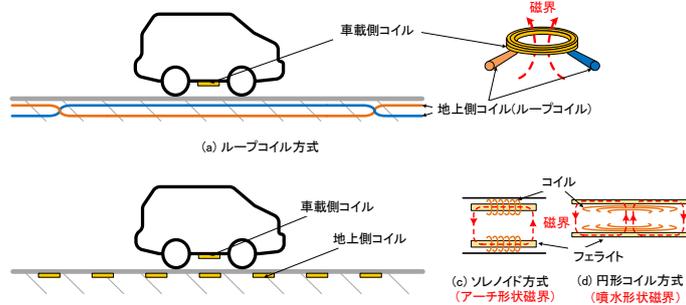


図 1 走行中非接触給電システム

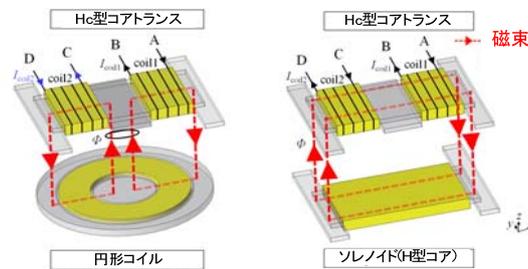


図 2 磁界分布の共用化可能な Hc 型コアトランス

2. 研究の目的

本研究の目的は、駐車中の EV 用非接触給電と共用可能な走行中非接触給電システムで、かつ地上側の非接触部分の磁界分布が異なる場合(ループコイル方式、飛び石円形コイル方式、飛び石ソレノイド方式など)でも給電可能な給電コイル(車載用 Hc 型コアトランス)を研究開発することである。走行中給電に適した Hc 型コアトランスの形状や寸法、コイル直並列接続の切換制御法を検討し、異なる地上側コイルに対する給電特性の比較と特性向上法を検討する。また、漏洩電磁界が少ない Hc 型コアトランスの構造や、地上側飛び石コイルの複数接続方式(直列・並列)と補償用コンデンサ配置の組合せ等についての論理的に解析するとともに、EV 搭載バッテリーに適した整流回路や異物等の影響について検討する。

3. 研究の方法

- (1) 駐車中の非接触給電において磁界分布が噴水形状となる円形コイル方式とアーチ形状となるソレノイド方式の共用化のために提案された Hc 型コアトランスの研究結果をもとに、走行中非接触給電用の車載側 Hc 型コアトランスの形状や寸法について検討し、回路解析と給電実験により最適形状を検討する。
- (2) 異なる地上側コイルに対する給電特性の比較と特性向上法を検討する。
- (3) 漏洩電磁界が少ない Hc 型コアトランスの構造について検討する。
- (4) 地上側飛び石コイルの複数接続方式(直列・並列)と補償用コンデンサ配置の組合せ等についての論理的に解析する。
- (5) EV 搭載バッテリーに適した整流回路や、海水など異物等の影響について検討する。

4. 研究成果

- (1) Hc 型コアトランスの形状や寸法による給電特性の比較を行った。駐車中給電用に製作した地上側 Hc 型コアトランスと磁界分布の異なるトランスの理論解析および実験結果をもとに、車載用の Hc 型コアトランスの形状と構造について検討し、数種類トランスを試作した。試作した Hc 型コアトランスの諸係数(抵抗、リアクタンス、結合係数など)を LCR メータにより測定し、等価回路から導いた諸式と回路解析ソフトおよび磁界解析ソフト JMAG を用いて論理的解析を行った。また、駐車中給電で使用した地上側トランスと 3kW の給電実験を行い(図 3)、解析結果と比較検討し、車載側 Hc 型コアトランスを設計する際有用となる理論式を導出した。(雑誌論文②、学会発表⑭)
- (2) 異なる地上側コイルに対する給電特性の比較と特性向上法の検討を行った。文献等をもと

表 1 中継、PS・SS 方式の理論式

	中継コイル方式	PS方式	SS方式
コンデンサ	$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1 (1 - \frac{M^2}{L_1 L_2})}$, $C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}$	$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1}$, $C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2 (1 - k^2)}$	$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1}$, $C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}$
入出力関係	$V_{in} = \frac{M}{M_{1r}} V_L = \frac{k_1}{k_2} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} V_L$, $I_{in} = \frac{M}{M_{1r}} I_L = \frac{k_1}{k_2} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} I_L$	$V_{in} = \frac{L_1}{M} V_L = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} V_L$, $I_{in} = \frac{M}{L_1} I_L = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} I_L$	$V_{in} = -j\omega M I_L = -j\omega k \sqrt{L_1 L_2} I_L$, $I_{in} = \frac{1}{j\omega M} V_L = -\frac{1}{j\omega k \sqrt{L_1 L_2}} V_L$
入力インピーダンス	$Z_{in} = \left(\frac{M}{M_{1r}}\right)^2 R_L = \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \frac{L_1}{L_2} R_L$	$Z_{in} = \left(\frac{L_1}{M}\right)^2 R_L = \frac{1}{k^2} \frac{L_1}{L_2} R_L$	$Z_{in} = \frac{(\omega M)^2}{R_L} = \frac{(\omega k)^2 L_1 L_2}{R_L}$
最大効率 負荷	$R_{Lmax} = \frac{k_1}{k_2} \omega Q_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2} \frac{Q_1}{Q_2}}$	$R_{Lmax} = k r_2 Q_2 \sqrt{k^2 + \frac{Q_1}{Q_2}}$	$R_{Lmax} = k r_2 \sqrt{Q_1 Q_2}$
最大効率	$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k_1 k_2 Q_1} \sqrt{\frac{L_1}{L_2} \frac{Q_1}{Q_2}}}$	$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k Q_1} \sqrt{k^2 + \frac{Q_1}{Q_2}}}$	$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k \sqrt{Q_1 Q_2}}}$
備考	$k := \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$, $k_{1r} := \frac{M_{1r}}{\sqrt{L_1 L_r}}$, $k_{2r} := \frac{M_{2r}}{\sqrt{L_2 L_r}}$, $Q_1 := \frac{\omega L_1}{r_1}$, $Q_2 := \frac{\omega L_2}{r_2}$, $Q_r := \frac{\omega L_r}{r_r}$		

に走行中給電で使用されている磁界分布の異なる地上側コイル(円形コイル、ソレノイドコイル)を製作し、車載用 Hc 型コアトランスとのトランス係数を測定すると共に、回路解析ソフトや磁界解析ソフトを用いて論理的解析を行って、給電実験範囲を比較検討した。そして、給電実験を行い駐車中給電との違いを比較した上で、特性向上法を検討し、車載用 Hc 型コアトランスの改良方法を検討した。(雑誌論文②、学会発表⑭)

(3) 地上側ループコイル方式に対する検討を行うとともに、地上側コイルの違いによる漏洩電磁界の影響を比較し、これを軽減するためのトランス巻線構造を検討した。その結果、従来、漏洩電磁界が大きかったソレノイド方式でも、複数巻線を有するラダー構造トランスを用い、かつその車載側トランスと結合係数の小さい巻線を短絡することにより、漏洩電磁界の強度を低減(1.5kW 給電時、高調波成分を含めて最大 8.5dB@3m 低減)できることを理論的、実験的に示した。(図 4)(学会発表⑪)

(4) 補償用コンデンサ配置などの違いによる検討も行った。一次直列二次直列コンデンサ配置(SS方式)以外として、一次並列二次直列コンデンサ配置(PS方式)や、一次直列二次直列コンデンサ配置の1次側コイル近くに中継コイル(図5)を付加した中継コイル方式などについて理論的解析を行い(表1)、車載側コイルがない場合、地上側コイルへの電力供給を最小にできることを明らかにした。また、これらを地上側飛び石式コイルとして用い、かつ各コイルを並列に接続すれば、切り替えスイッチがない場合でも、高効率で車載側コイルのみに電力を給電可能であることを回路解析ソフトおよび磁界解析ソフト JMAG を用いて論理的に示し、給電実験を行って検証した。(雑誌論文①、学会発表⑨、⑩、⑫、⑬)

(5) 計画2年目(H29年度)途中に駐車中のEV非接触給電の磁界分布が噴水形状(車載側は基本円形コイル)に標準化されたため、当初予定していた車載側 Hc 型コアトランスの磁束切り替え方法を検討せず、主眼を地上側の飛び石式コイルを用いた走行中給電の性能向上に絞り、飛び石式コイルの構造と接続方式について検討した。複数巻線を有するラダー構造トランスを地上側飛び石式コイルに用いて、車載側円形コイルと給電可能な磁界分布を形成できる方式を検討した。成果(2)で示したようにソレノイド方式と同様に車載側トランスと結

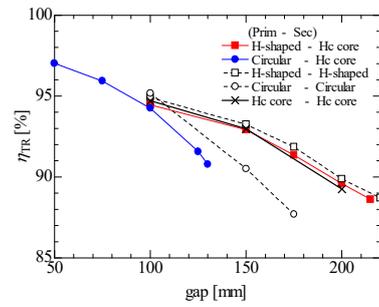
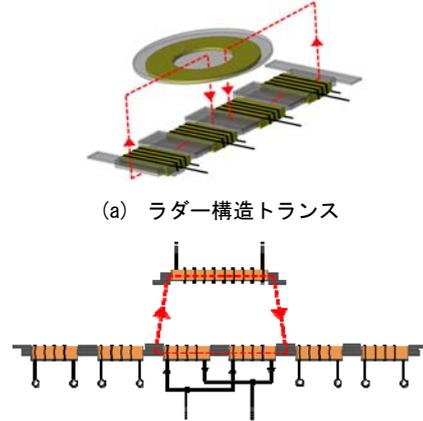
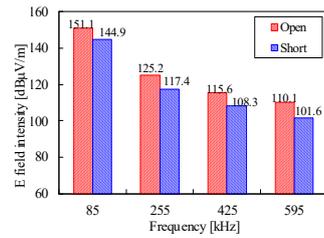
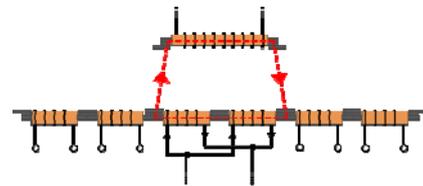


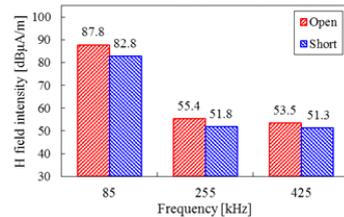
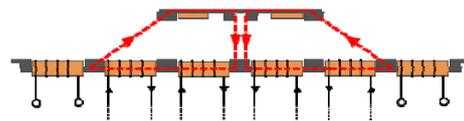
図 3 ギャップ長変動時の給電効率比較



(a) ラダー構造トランス



(b) 対ソレノイドコイル



(c) 対円形コイル

図 4 ラダー構造トランスによる漏洩磁界低減法と端部コイル開放・短絡時の漏洩電界比較

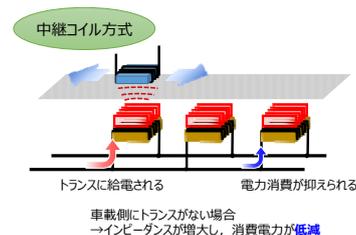


図 5 中継コイル方式

合係数の小さい巻線を短絡することにより、効率を低下させないで漏洩電磁界の強度を低減(1.5kW 給電時、高調波成分を含めて最大 5dB@3m 低減)できることも理論的、実験的に示した。(図 4) (学会発表①)

(6) 地上側飛び石式コイルの接続方式を直列および並列に接続した場合の給電効率等について、共振コンデンサの接続方法(一次直列二次直列、一次並列二次直列)を変えて比較検討し、各接続方法で高効率を得るためのコイル接続方法やコンデンサ値の決定方法などについて理論的解析を行った(図 6)。地上側および車載側の片方あるいは両方に中継コイルを設置した場合の解析も行い、移動中に結合係数が変化する飛び石式コイルシステムの効率変動を中継コイルにより緩和可能かどうか検討し一定の成果を得た(図 7)。(学会発表④~⑧、図書①)

(7) 負荷回路(車載側トランスの出力回路)が非接触給電システムに及ぼす影響を検討するために、走行中非接触給電システムの負荷変動特性を解析し、負荷回路と補償用コンデンサ配置との関係や、効率特性や漏洩電磁界等に及ぼす影響を検討した。また、路面状況の変化として海岸線の路面を想定して異物として塩水の影響も検討した。(学会発表②、③)

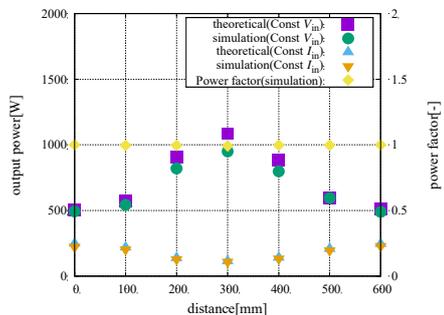
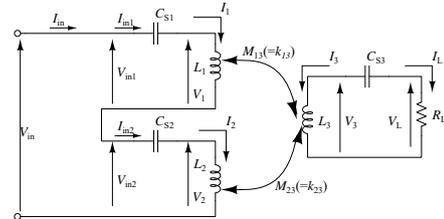
5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

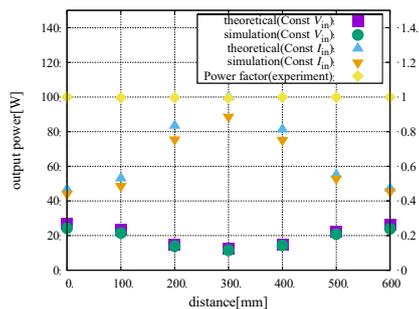
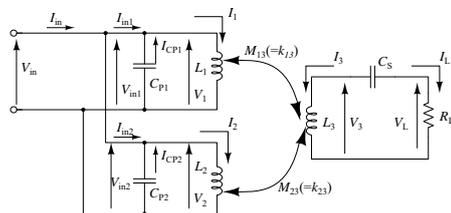
- ① 山田潤、津田和真、小林涼太、金子裕良、可変インピーダンスを考慮した非接触給電システムの回路解析と特性評価、電気学会論文誌 D、査読有、Vol. 137、2017、815-826
DOI:10.1541/ieejias.137.815
- ② 山田潤、清水良太郎、小林涼太、金子裕良、円形及びソレノイド型磁界結合方式非接触給電トランスと共用可能な Hc 型トランスの回路解析と性能評価、電気学会論文誌 D、査読有、Vol. 136、2016、891-900
DOI: 10.1541/ieejias.136.891

[学会発表] (計 14 件)

- ① 高橋明伸(金子裕良)、一次ラダー型・二次円形トランスを用いた非接触給電に関する研究、平成 31 年電気学会全国大会、2019 年
- ② 窓岩尚史(金子裕良)、特定の補償回路によらない一般的な磁界結合型電力伝送システムの解析と設計法、平成 31 年電気学会全国大会、2019 年
- ③ 眞榮城圭里(金子裕良)、出力電圧を考慮した非接触給電回路の考察、平成 31 年電気学会全国大会、2019 年
- ④ 奈良健司(金子裕良)、変圧器と同じ入出力特性をもつワイヤレス電力伝送回路、平成 31 年電気学会全国大会、2019 年
- ⑤ K.Nara (Y.Kaneko)、An Evaluation of Wireless Power Transfer System with Plural Repeater Coils for Moving Objects、IEEE IECON2018 Washington D.C.、2018 年
- ⑥ H.Uno(Y.Kaneko)、Analysis of Circuit for Dynamic Wireless Power Transfer by Stepping Stone System、EVS31 Kobe、2018 年
- ⑦ Y.Shiozawa(Y.Kaneko)、Dynamic Contactless Power Transfer System using PS Topology Considering Mutual Coupling of Transmitter Coils、EVS31 Kobe、2018 年

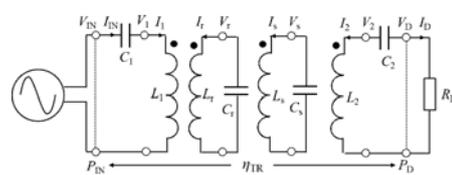


(a) 直列 SS 方式

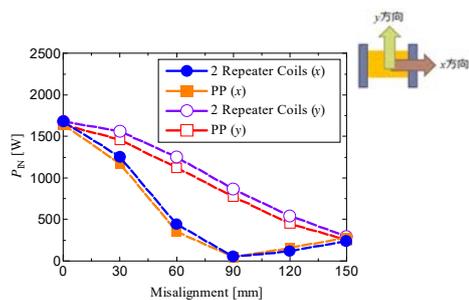


(b) 並列 PS 方式

図 6 飛び石式コイルの接続方式と定電圧・定電流入力時の出力および力率変化



(a) 中継 2 巻線方式



(b) 出力電力

図 7 中継 2 巻線方式と PP 方式の位置ずれ特性

- ⑧ 塩澤佳輝(金子裕良)、可変コンデンサを用いた PSS 方式非接触給電回路の検討、平成 30 年電気学会産業応用部門大会、2018 年
- ⑨ 福島健太(金子裕良)、二次側複数コイルにおける非接触給電回路の解析、平成 30 年電気学会全国大会、2018 年
- ⑩ 福島健太(金子裕良)、受電部複数コイルにおける非接触給電回路の解析、平成 29 年電気学会産業応用部門大会、2017 年
- ⑪ 高橋明伸(金子裕良)、非接触給電における漏洩電磁界低減法の検討、平成 29 年電気学会産業応用部門大会、2017 年
- ⑫ 田中薫(金子裕良)、電気自動車用 25kW 走行中非接触給電システムの高速度道路への展開検討、自動車技術会 2017 年春季大会、2017 年
- ⑬ 津田和真(金子裕良)、走行中非接触給電システムに適した回路方式の検討、平成 29 年電気学会全国大会、2017 年
- ⑭ 山本達哉(金子裕良)、磁界構造の異なる非接触給電トランスの共用化に関する研究、平成 28 年電気学会産業応用部門大会、2016 年

〔図書〕(計 1 件)

- ① 堀洋一、横井幸雄、金子裕良他、エヌ・ティー・エス社、電気自動車のモーションコントロールと走行中ワイヤレス給電、2019 年、pp356-365

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://akt.ees.saitama-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。