

電気自動車への非接触給電の実用化に向けた伝送特性の把握

鳥海大輔・金藤康昭・重高浩一

1. はじめに

非接触給電技術は金属製のコネクタや電線を介さずに電力を送る技術であり、携帯電話端末をはじめとする一部の家電製品や産業用機器などにおいて既に実用化されている。非接触給電技術には電磁誘導方式、磁界共振方式、マイクロ波やレーザーによる方式等が研究されているが、現在実用化されているものの多くは送電側と受電側とが近接することによって高効率を得られる電磁誘導方式によるものである。非接触給電技術に関する世界の研究開発は、適用分野の拡大のため給電側と受電側との離隔を広くとって高効率で給電できる方法に向けられており、磁界共振方式が最有力と見られている。

一方、環境問題、エネルギー問題の観点から電気自動車の普及に向けた取り組みが国、地方自治体の双方で行われており、航続距離の延長と充電インフラの充実が課題として挙げられている。

国土技術政策総合研究所では、電気自動車への充電方法の一つとして、磁界共振方式を用いた非接触給電に着目し、これまでに磁界共振方式の基礎実験及び模型車両を用いた実験を通じて走行中車両への給電の可能性について実証を行ってきた。

本稿は実用化にあたって必要となる磁界共振方式の距離特性及び路盤材等による影響について、実験結果を元に報告するものである。

2. 非接触給電技術の原理

2.1 電磁誘導方式と磁界共振方式の違い

電磁誘導方式の原理は、一次側のコイルに電流を流した際に発生する磁束が二次側のコイルを貫き、この磁束の変化を妨げる向きに電流が発生するというものである。一次側コイルで発生した磁束が二次側コイルに伝送する率は結合係数Kで表され、電磁誘導における伝送効率はこの結合係数に依存する。このため電磁誘導では一次側コイル

と二次側コイルとの離隔を小さくし結合係数を1に近づけることが求められる。

磁界共振方式は、磁界を利用する点は電磁誘導方式と同様であるものの、一次側、二次側の双方の回路において共振回路を構成し、結合係数が小さな値となっても特定の周波数（共振周波数）において高い伝送効率を得るものである。

磁界共振結合を2006年に発表したMITによると伝送効率 η は、結合係数Kと一次側回路と二次側回路の選択度 Q_1 、 Q_2 を使って式(1)で表すことができる。

$$\eta = \frac{K^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + K^2 Q_1 Q_2})^2} \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

なお、選択度とは共振回路における周波数特性を表す選択度であり、共振周波数 ω_0 と半値幅（振動エネルギーPが最大値 P_0 の50%以上となる周波数幅） $\Delta\omega$ の比で表す。

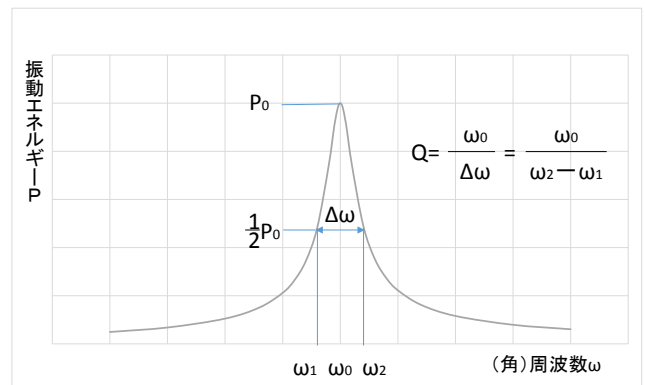


図-1 選択度Q

2.2 磁界共振方式の等価回路及び理論式

磁界共振方式の回路図を図-2に示す。 L_1 、 L_2 は一次側及び二次側コイルの自己インダクタンス、 L_m はコイル間の相互インダクタンス C_1 、 C_2 は共振回路を構成するためのコンデンサ、 R_L は負荷抵抗、 R_1 、 R_2 はその他回路中に含まれる抵抗分である。また、この回路の結合係数は式(2)、一次側、二次側の選択度は式(3)、式(4)で求められる。

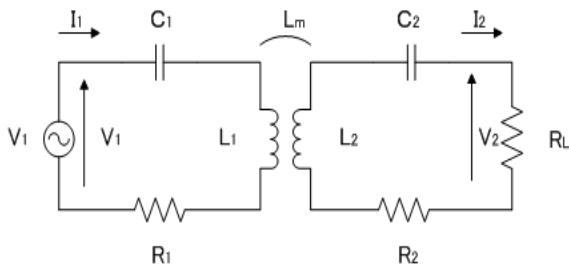


図-2 磁界共振回路

$$K = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{R_1} = \frac{1}{\omega_0 C_1 R_1} = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \dots\dots \text{式(3)}$$

$$Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_2} = \frac{1}{\omega_0 C_2 R_2} = \frac{1}{R_2} \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \dots\dots \text{式(4)}$$

また、共振周波数は相互インダクタンス L_m の影響で2つ存在するが、磁界共振方式では一次側と二次側の離隔を広くとることが多く、相互インダクタンス L_m が自己インダクタンス L_1 、 L_2 に比べ非常に小さな値となることから、式(5)で近似値を求めることができる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \dots\dots\dots \text{式(5)}$$

2.3 介在物による伝送への影響

電気自動車への非接触給電では、道路（地中）に埋設した装置から車両への給電を想定しており、送電側（一次側コイル）と車両（二次側コイル）との間に土やアスファルトといった路盤材が介在する。このため、コイルの間に介在物があった場合の影響を明らかにする必要がある。

一般的に磁極から離れた任意の点の磁界の強さ H は式(6)で表される。

$$H = \frac{1}{4\pi\mu_0\mu_r} \frac{m}{r^2} [\text{A/m}] \dots\dots\dots \text{式(6)}$$

ここで、 m は磁極の強さ[Wb]、 r は磁極からの距離[m]、 μ_0 は真空中の透磁率（ $=4\pi \times 10^{-7}$ ）[H/m]、 μ_r は比透磁率（物質の磁化のしやすさを表す値であり、真空状態を1としてその度合いを表したもの）である。表-1に物質の比透磁率を示す。

表-1 物質の比透磁率

物質	比透磁率
銅	0.999991
水	0.999991
真空	1
空気	1.0000004
アルミニウム	1.00002
ニッケル	600
軟鉄	2,000
鉄	5,000
硅素鋼	7,000
純鉄	200,000

磁界共振方式におけるエネルギー伝送は、電磁誘導方式と同様にコイルを貫く磁束 ϕ の変化によるものと考えられる。一次コイルから二次コイルに伝わる磁束 ϕ は H と比例関係にあることから、コイル間に比透磁率の高い物質が介在する場合には伝送効率が変化する。

ただし、土やアスファルトといった道路を構成する材料は比透磁率が小さい(磁化されにくい)と考えられることから、伝送への影響は非常に小さいと想定される。

3. 磁界共振方式による給電実験

3.1 実験方法

実験は、磁界共振方式による給電に対する路盤材の影響を確認するものである。先ず基準となる空气中において、コイルの離隔を変化させながら伝送できる電力の測定を行う。次に一次側（送電側： L_1 ）コイルと二次側（受電側： L_2 ）コイルの間に路盤材を介在させた場合の電力を測定し値を比較することで、その影響を把握する。実験装置の構成は図-3のとおりとし、送電側には電源装置から100V、100kHzの方形波を入力した。

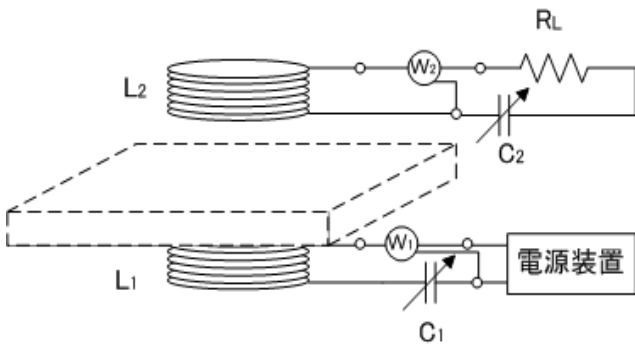


図-3 実験装置の構成

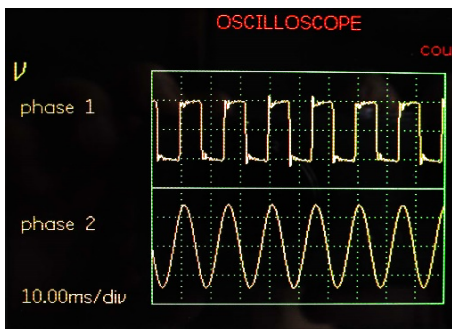


図-4 入出力波形（上側：一次側，下側：二次側）

なお、実験に用いた送受電コイルの特性は表(2)のとおりであり、測定値の変化から送受電コイルの離隔が15cmまでは相互インダクタンス L_m の影響が大きいことがわかる。

表-2 送受電コイルの特性

離隔[cm]	インダクタンス[mH]		レジスタンス[Ω]	
	送信側	受信側	送信側	受信側
0	1.624	3.017	10.2	19.8
5	1.606	2.996	5	12.2
10	1.601	2.991	4.4	11
15	1.6	2.99	4.1	11
20	1.599	2.989	4.02	10.8
30	1.595	2.99	4.02	10.7

3.2 実験結果

実験の状況を図-5に示す。

なお、離隔のうち、5cmは実験装置の構造によるギャップであり、路盤材を介在させた場合の路盤材の厚さは離隔-5cmである。また離隔によって、相互インダクタンスが若干変化することから、その都度、コンデンサを調整して共振周波数を100kHzに調整した。

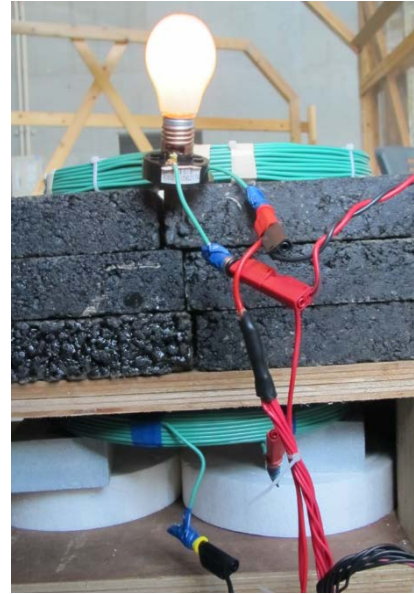


図-5 路盤材を介在させた伝送特性実験

表-3 伝送特性（空气中）

離隔[cm]	空气中		
	入力[W]	出力[W]	伝送効率
10	16.8	15.1	0.899
15	22.7	18.4	0.811
20	12.2	9.9	0.811
25	6.1	4.8	0.800
30	2.5	2.1	0.817

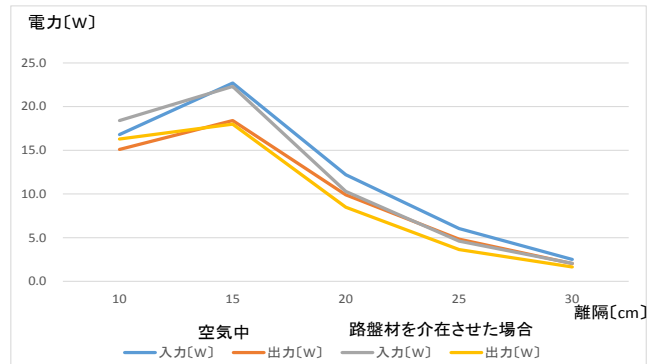


図-6 伝送特性

3.3 検証結果

実験の結果、磁界共振方式による給電においては一次側コイル（送電側）と二次側コイル（受電側）の間に路盤材を介在させた場合、空气中と比べ伝送効率が1%~1.5%低下する現象が見られた（表-3、表-4参照）。

また、表-1に示した比透磁率によると、一次側コイルと二次側コイルの間に比透磁率が1付近の金属を介在させても、伝送効率に影響が出ないと

表-4 伝送特性（路盤材を介在）

離隔 [cm]	路盤材介在		
	入力[W]	出力[W]	伝送効率
10	18.4	16.3	0.886
15	22.3	18.0	0.807
20	10.3	8.5	0.825
25	4.6	3.6	0.790
30	2.1	1.7	0.802

予想されたため、アルミニウム板を介在させたところ、出力が大きく低下する現象が見られた。これはアルミニウム板によって、相互インダクタンスが変化したことが原因であり、誘導起電力を生じる導体が介在するとその給電に大きな影響を与えることを確認した。

3.4 考察

空気中の伝送特性の結果からは、磁界共振方式による電力伝送では伝送距離が近いほど伝送電力を増加できるということではなく、多くの電力を伝送するのに適した離隔というものが存在することが分かる。これは実際に磁界共振方式を用いて道路から車両へ給電を行う場合、一次側コイル（送信側）の埋め込みの深さは勿論のこと、電気自動車側においても地上から二次側コイル（受信側）と路面との距離を合わせておく必要が生じるということにつながる。

今回の実験では一次側コイルと二次側コイルとの離隔は大きくとれなかったが、離隔を大きくとれるようにするには、選択度 Q を大きくすることが必要となる。これには式(3)、式(4)で示したように、コイルのインダクタンスを大きくすること及び回路のレジスタンス分を小さくすることが必要となる。具体の対策としてはコイルの作り方や電源回路及び負荷回路を共振回路に直接接続しない方法が考えられるが、選択度 Q を大きくするに

従って、同調点付近の特性がより鋭くなり、回路の共振周波数の小さなずれがあっても伝送効率に変化を生じるため、実現にあたっては周波数制御の方法が実現に向けての重要な要素となるものと思われる。

4. 今後の検討課題

今回の実験によって、磁界共振方式を用いて、道路に埋設した装置から車両への非接触給電が可能であることを確認できた。ただし、道路への埋設においては道路面からの深さ60cm確保が一つの目安となり、この場合、80cm～1m程度の離隔を高効率で伝送できることが求められる。

更に、走行中の電気自動車への給電においては車両と送電側との位置関係、車両の速度による影響についても考慮する必要がある。

謝 辞

本研究の実施に先立ち、理論及び実験に関するご指導、ご協力をいただいた、東京大学大学院の加藤昌樹氏、畑勝裕氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤昌樹：磁界共振結合による電気自動車へのワイヤレス給電、博士論文 東京大学大学院、2013年12月
- 2) 居村岳広、内田利之、堀洋一（東京大学）：非接触電力伝送における電磁誘導と電磁界結合の統一的解釈
- 3) 遠井敬大、金子裕良、阿部茂：非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現、電気学会論文誌D、IEEJ Trans. IA Vol.132、2012

鳥海大輔



国土交通省国土技術政策総合研究所防災・メンテナンス基盤研究センターメンテナンス情報基盤研究室 研究官
Daisuke TORIUMI

金藤康昭



国土交通省国土技術政策総合研究所防災・メンテナンス基盤研究センター 情報研究官
Yasuaki KINTO

重高浩一



国土交通省国土技術政策総合研究所防災・メンテナンス基盤研究センターメンテナンス情報基盤研究室長
Koichi SHIGETAKA