

ワイヤレス電力伝送におけるフェライトレスかつコンデンサレスコイルの層間材料の誘電体損失による影響

堀 昂樹*, 居村 岳広 (東京理科大学)

Effect of Dielectric Loss on Interlayer Material for Ferrite-less and Capacitor-less coil in Wireless Power Transfer

Koki Hanawa, Takehiro Imura (Tokyo University of Science)

1. まえがき

走行中給電 (DWPT:Dynamic wireless power transfer) における磁界共振結合回路はコイルに大量の共振コンデンサを接続するためコストがかかる。また、インダクタンスを大きくし、結合係数を高めるためにフェライトが用いられることにより、重量増加とコストの増加が課題となっている。そこで、本稿では送電コイルにコンデンサレスかつフェライトレスの 2 層式オープン型スパイラルコイルの WPT (Wireless power transfer) システムを採用する。なお、DWPT の国際規格の動向に基づき、動作周波数 (共振周波数) は 85kHz 帯とする。

先行研究では層間材料の誘電体を $\tan\delta$ の小さい材料に変えていったことでコイル抵抗の低減に成功した⁽¹⁾。しかし、層間材料として比較されていた誘電体は PMMA (アクリル) と PE (ポリエチレン) の 2 種類のみであり、 $\tan\delta$ と Q 値やコイル抵抗の関係が示されていなかった。そこで、本稿では実際にコイルを作製し、PMMA、ABS、PVC (ポリ塩化ビニル)、PC (ポリカーボネート)、PE (ポリエチレン) の 5 種類の誘電体を比較するとともに、 $\tan\delta$ による Q 値やコイル抵抗の関係を検討する。

2. 誘電体損失

ワイヤレス電力伝送ではコイルに流れる電流は交流電流である。交流電流によってコイルが損失を発生する要因は表皮効果と近接効果などである⁽²⁾。しかしながら、コイルを形成する材料の損失も重要である。本稿では、その損失に着目する。オープン型コイルは、浮遊容量 C_1 を用いて共振するのでコイル近傍に誘電体があるとコイル抵抗に影響する。2 層オープン型コイルは 1 層目と 2 層目の間に樹脂 (誘電体) が用いられている。したがって、誘電体の誘電正接 ($\tan\delta$) による抵抗 R_{dielect} は次式で表される⁽³⁾。図 1 に $\tan\delta$ の等価回路図とベクトル図を示す。

$$R_{\text{dielect}} = \frac{\tan\delta}{\omega C_1} \quad (1)$$

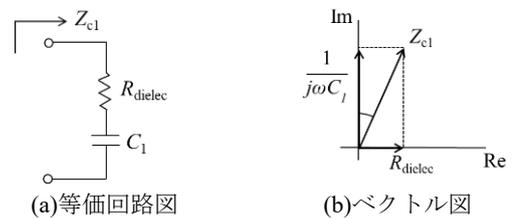


図 1 $\tan\delta$ の等価回路図とベクトル図

Fig.1 Equivalent circuit and vector of $\tan\delta$

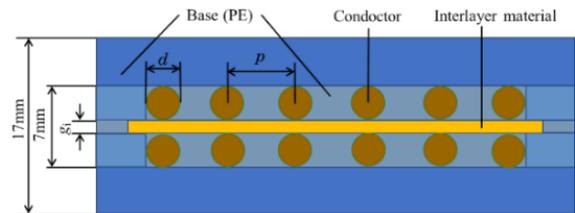
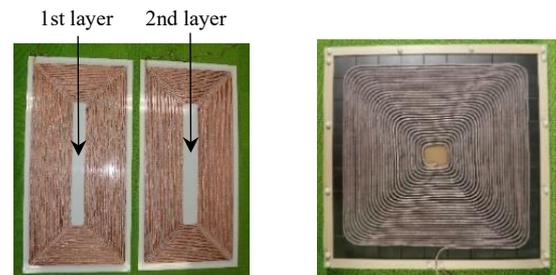


図 2 2 層コイルの構造図 (断面図)

Fig.2 Actual structure of 2 layer coil (Sectional view)



(a)送電コイル

(b)受電コイル

図 3 作製したコイル

Fig.3 Experimental coils

3. 誘電体の比較

<3・1>コイルの作製 5 種類の誘電体を比較するにあたって図 2 のような 2 層構造のオープン型コイルを作製した。実際に作製したコイルは図 3(a)のように 1 層目と 2 層目が分離でき、それらを重ね合わせることで 1 つの送電コイルとして機能する。

受電コイルは Q 値が 407 の図 3(a)のようにフェライトを

使用した一般的なショート型コイルである。表 1 に作製したコイルの仕様を示す。

表 1 作製したコイルの仕様
Table 1. Specification of experimental coils

	送電コイル	受電コイル
コイル外寸 [mm]	600×1300	400×400
巻数 t	36	30
導体外径 d [mm]	3	3
線間ピッチ p [mm]	7	6
層間ギャップ g_i [mm]	4	-
誘電体の外寸 [mm]	640×1360	-

<3・2>実験結果 送電コイルの層間材料を PMMA, PVC, ABS, PC, PE の 5 種類の誘電体に変えていったときの各コイルの共振周波数 f_0 、インダクタンス L 、キャパシタンス C 、内部抵抗 R_1 、 Q 値の測定結果を表 2 に示す。測定にはインピーダンスアナライザ E4990A を用いた。また、データシート⁽⁴⁾を参考に各誘電体の $\tan\delta$ を示した。

図 4 に $\tan\delta$ に対する Q 値と内部抵抗 R_1 の関係を示した。図 4 より、 $\tan\delta$ と Q 値は負の相関が、 $\tan\delta$ と内部抵抗 R_1 は正の相関にあることを示せた。

表 2 各誘電体の測定結果

Table 2. Measurement results of each dielectric

	PMMA	PVC	ABS	PC	PE
f_0 [kHz]	78.99	79.32	79.94	79.24	81.52
L [mH]	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04
C [nF]	1.990	1.973	1.943	1.977	1.868
R_1 [Ω]	7.48	4.60	2.82	2.05	1.30
Q	135	221	364	496	799
$\tan\delta$	0.04	0.014	0.005	0.0013	0.0005

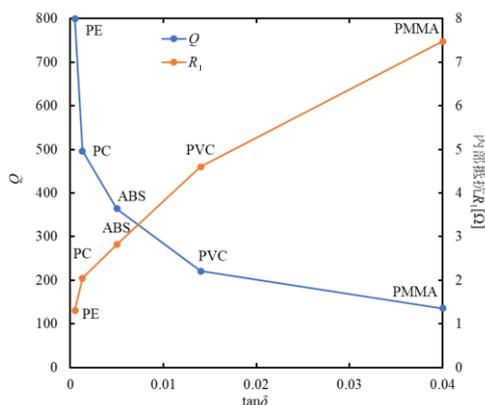


図 4 $\tan\delta$ による Q 値と内部抵抗 R_1 の関係

Fig.4 Relationship between quality factor and internal resistance R_1 by $\tan\delta$

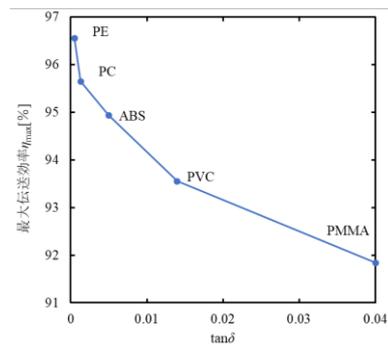


図 5 $\tan\delta$ による最大伝送効率 η_{\max}

Fig.5 Maximum transmission efficiency by $\tan\delta$

<3・3> $\tan\delta$ による最大伝送効率 η_{\max} 図 5 に結合係数 $k=0.1$ としたときの最大伝送効率 η_{\max} を示した。 $\tan\delta$ が 0.0005 の PE は η_{\max} は 96.6%、 $\tan\delta$ が 0.04 の PMMA は 91.8% だった。よって、 $\tan\delta$ が大きくなると η_{\max} は小さくなり負の相関にあることが確認できた。

4. まとめ

本稿では実際に 2 層式オープン型コイルを作製し、層間材料を PMMA, PVC, ABS, PC, PE の 5 種類の誘電体を比較することで $\tan\delta$ と Q 値は負の相関、 $\tan\delta$ と内部抵抗 R_1 は正の相関にあることが示された。また、 $\tan\delta$ と最大伝送効率 η_{\max} は負の相関にあることが確認できた。

本稿で作製した 2 層コイルは層間ギャップ g_i を保持するために層間材料が必要不可欠であった。そのため、異なる $\tan\delta$ の誘電体同士を比較したが、今後の展望として誘電体の有無の特性の比較を視野に入れている。そのために、層間材料を必要としないコイル構造を考える必要がある。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 17H04915 の助成を受けたものです。

文 献

- (1)高橋芳明, 畑勝裕, 居村岳広, “走行中ワイヤレス給電に向けたコンデンサレスかつフェライトレス 85kHz 自己共振コイルの低抵抗化”, 産業応用部門誌, Vol. 139, No.3, pp.734-742, 2019.
- (2)居村岳広, “磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送”, 森北出版株式会社, 2017.
- (3) 高橋芳明, 畑勝裕, 居村岳広, 堀洋一, “誘電体損を考慮した走行中ワイヤレス給電向けコンデンサレスかつフェライトレス 85kHz 自己共振コイルの実験検証”, 信学技報, vol. 118, no. 115, WPT2018-21, pp. 61-66, 2018.
- (4)“プラスチックの物性一覧表”, <http://mizuhokasei.co.jp/pdf/resin.pdf> (参照 2019-12-12)