

# 走行中ワイヤレス給電における

## 1 層オープン型コイルの提案

カク イチタク\* 居村 岳広 堀 洋一 (東京理科大学)

Proposal for a Single-layer Caseless Open-end Coil for Dynamic Wireless Power Transfer

Ichitaku Kaku\*, Takehiro Imura, Yoichi Hori

(Tokyo University of Science)

This paper proposes a one-layer open-type coil with self-resonance in the 85 kHz frequency band. Experimental results show that even without the coil case, a converted value power of 12.2 kW is obtained at a transmission distance of 250 mm and a transmission efficiency of 90% is achieved.

キーワード: ワイヤレス電力伝送, 走行中ワイヤレス給電, オープン型コイル, 磁界共振結合  
(Wireless Power Transfer Dynamic, Wireless Power Transfer, Open-end Coil, Magnetic Resonant Coupling)

### 1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みの中で、電気自動車 (EV) の普及が重要な役割を果たしている。EV の普及には多くのメリットがあるが、コストが高い、航続距離や充電時間などの課題が普及の妨げとなっている<sup>(1)-(4)</sup>。これらの課題を克服するための解決策として、走行中ワイヤレス給電技術 (Dynamic Wireless Power Transfer: DWPT) の導入が検討されている<sup>(1)-(5)</sup>。現在、多くの走行中ワイヤレス給電システムで使用されているショート型コイルは、共振コンデンサの大量使用によりコストが増加する。この問題に対処するため、コンデンサを使用しないオープン型コイルが注目されている。

オープン型コイルの利点は巻線自身も浮遊容量で自己共振されることができるために、外付けの共振コンデンサが不要な点である。欠点として、浮遊容量は一般に非常に小さい値であるため、一般的に MHz 以上の周波数利用に限られることがあげられる<sup>(6)</sup>。EV における走行中ワイヤレス給電は 85kHz 帯が規格であることから、先行研究として走行中ワイヤレス給電用のオープン型コイルはこの周波数帯で共振させるために一般的には巻線を重ねた 2 層構造が提案されており、巻き数を増やすことで kHz 帯での共振も可能にしている<sup>(7)-(10)</sup>。ただし、2 層構造のため層間距離に依存し、コイルケースの使用による高コストという課題がある。

本論文では 85kHz 周波数帯域で自己共振する 1 層オープン型コイルを提案する。この提案は、従来の 2 層構造に

代わるものであり、層間距離に依存しないため、コイルケースを使用せずに済むことから、コイル自体のコスト削減に大きく寄与する。

### 2. シミュレーションによる検証

オープン型コイルは、その構造が持つインダクタンス  $L$  と浮遊容量により自己共振するため、ショート型コイルのように外部から共振コンデンサを接続して共振周波数を調整することができない。この特性によりオープン型コイルの設計と製造は直感や経験則だけでは不十分であり、所望の共振周波数の達成や内部抵抗の予測が難しい場合がある。このような課題に対処するため、1 層式オープン型スパイラルコイルの設計と製造に際して、モーメント法の電磁界解析ソフトウェアである FEKO を利用して詳細な設計と解析を行う。但し、本章での電磁界解析による設計はコイルパラメータのおおよその値を決めるにとどめ、最終的なパラメータ調整は実験を基に行う。

1 層式オープン型コイルは巻線途中の時、二つの角が交差してしまう。この問題に対して、交差点で片側リッツ線をトンネル状にすることで回避できる。線と線の交点を図 1 に示す。



図 1 1 層式オープン型コイルの交差部分

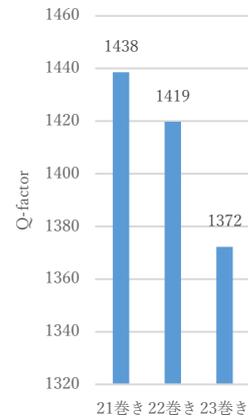
Fig. 1 Intersection of one-layer open-type coils

解析値 85kHz 前後を達成するため、線径 5.1mm のリッツ線を使用して、線間ピッチを 6.1mm に固定して、21(左巻)+21(右巻)巻~23(左巻)+23(右巻)巻の間で 1 層オープン型コイルを検討する(奇数巻きは左巻き、偶数巻きは右巻き)。解析の際に使用したコイルのパラメータを表 1 に示す。解析結果は図 2 に示す。

表 1 解析での 1 層オープン型コイルの仕様

Table 1 One-layer open coil specifications in the analysis

Coil size	1700x600mm		
Number of turns	21+21	22+22	23+23
Pitch	6.1mm		
Interlayer gap	なし		
Conductor diameter	5.1mm		



(e)Q 値

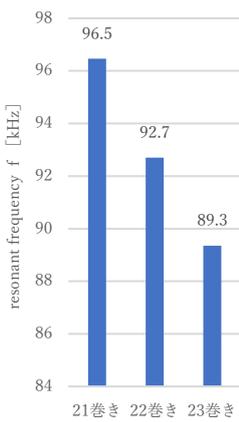
図 2 1 層オープン型コイルの解析結果  
Fig. 2 Analysis results for one-layer open coils

図 2 の(a)より、1 層オープン型コイルは線径 5.1mm のリッツ線を使用して、サイズが 1700x600mm、ピッチが 6.1mm、23 巻きの時 85kHz 帯(85kHz~90kHz)を達成する。

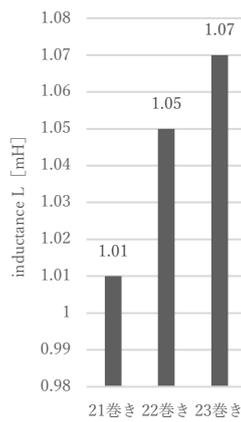
### 3. 実験による検証

#### 〈3・1〉1 層オープンコイル作り

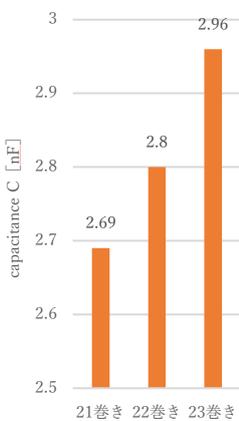
前章の電磁界解析の 1 層オープン型コイルの仕様を参考にしてコイルを作製した。使用した導線は線径 5.1mm、素線数が 1000 本で素線径が 0.01mm の New England Wire Technologies(NEWT) 社防水被覆付きリッツ線である。作製の流れを図 3 に示す。結束バンドを使用して作製するため、コイルケースは不要である。作製したコイルの仕様を表 2 に示す。本論文で作製した 1 層式オープン型スパイラルコイルはできるだけ低い周波数で共振させるため、サイズと巻き数が解析結果より大きくした。



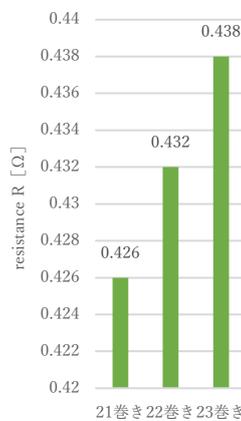
(a)共振周波数



(b)インダクタンス



(c)静電容量



(d)内部抵抗



図 3 1 層オープン型ケースレスコイル作りの流れ  
Fig. 3 Flow of making one-layer open caseless coils

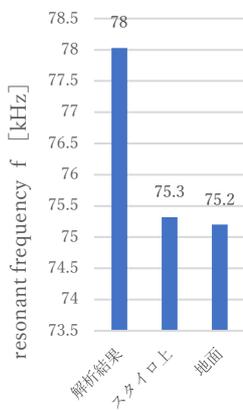
表2 作製した1層オープン型コイルの仕様

Table 2 Specifications of the fabricated 1-layer open-type coil

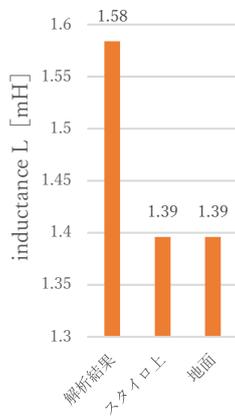
Coil size	1700x900mm
Number of turns	27.5+27.5
Pitch	7.5mm
Interlayer gap	なし
Conductor diameter	5.1mm
Total track length	約 200m

〈3・2〉解析結果と実測結果の比較

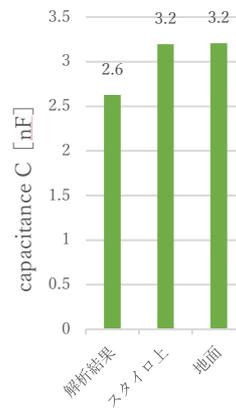
作製した1層オープン型コイルの寸法に基づいて、再度モーメント法の電磁界解析ソフトのFEKOを用いて解析した。解析結果と測定結果は図4に示す。測定にはKeysight Technologies社のインピーダンスアナライザE4990Aを使用する。周囲の環境の影響がない状態のコイル特性を見るためスタイロフォーム上で測定した。走行中給電では地面にコイルを埋設する必要があるため、地面上での影響を見るために地面上(アスファルト)で測定した。スタイロ上と地面上(アスファルト)の二つのパターンでの測定風景を図5、図6に示す。



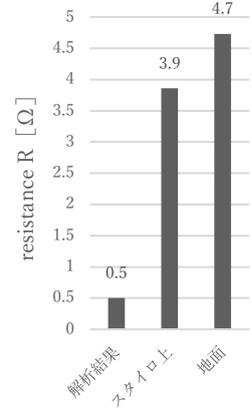
(a)共振周波数



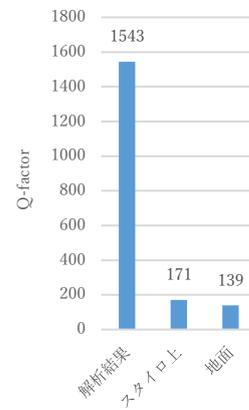
(b)インダクタンス



(c)静電容量



(d)内部抵抗



(e)Q値

図4 解析結果と測定結果の比較

Fig. 4 Comparison of analysis and measurement results



図5 スタイロフォーム上での測定風景

Fig. 5 Measurement scene on the Styrofoam

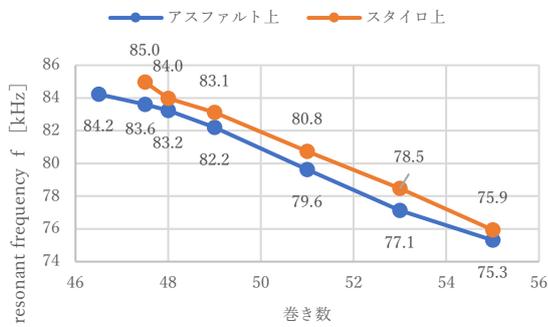


図 6 アスファルト上での測定風景  
Fig. 6 Measurement scene on asphalt

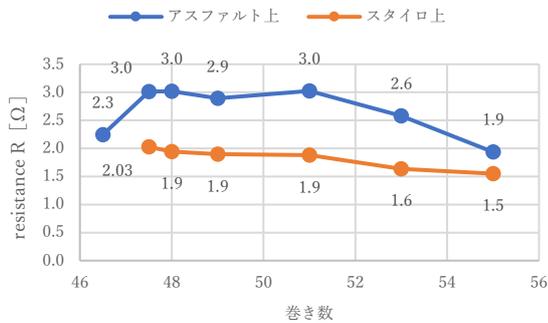
図 4 より、解析結果と実測結果を比較すると、共振周波数が約 3kHz 低下し、インダクタンスは約 0.2mH 低下、内部抵抗約 7 倍~9.5 倍上昇、Q 値約 9 倍~11 倍低下している。27.5+27.5 巻の場合 75kHz の自己共振に成功し、真ん中から巻数を減らしインダクタンスと静電容量を減少させることで 85kHz の自己共振を達成できると推察される。

### 〈3・3〉1 層オープン型コイルの調整

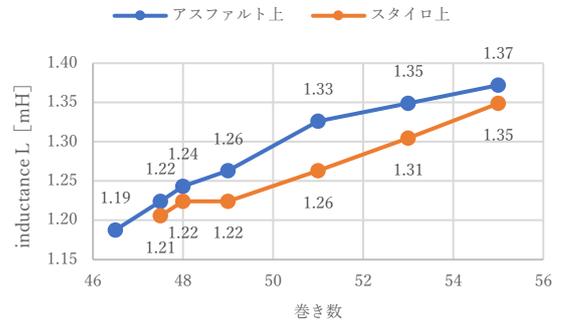
作製した 1 層オープン型コイルを 85kHz で共振させるため、真ん中から巻数を減らして調整する。巻き数による各特性変化を図 7 に示す。



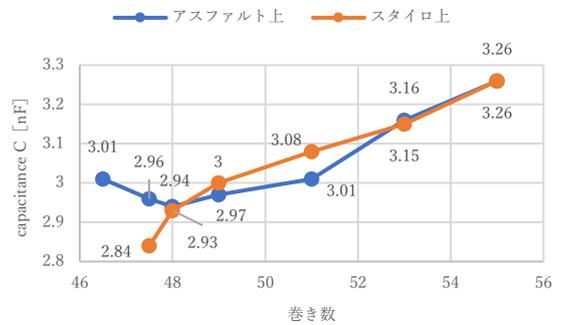
(a)共振周波数 f



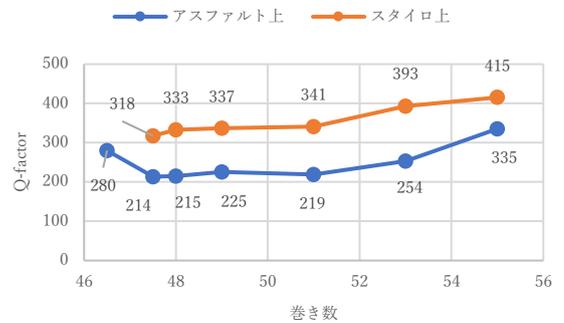
(b)内部抵抗 R



(c)インダクタンス L



(d)容量 C



(e)Q 値

図 7 1 層オープン型コイルの巻き数による各特性変化  
Fig. 7 Variation of each property with number of turns in a 1-layer open-type coil

図 7(a)より、23.5+24 巻きでスタイロ上に置いた場合は 85.0kHz の共振周波数を達成する。23+23.5 巻きでアスファルト上に置いた場合は 84.2kHz の共振周波数を達成する。

### 〈3・4〉VNA による電力伝送評価

本節では Keysight Technologies 社製の ENA シリーズネ

ットワークアナライザ (VNA) E5061B を用いて、作製した 1 層式オープン型スパイラルコイルの負荷電力、伝送効率を測定するために VNA を用いて測定を行った。測定方法としては、製作した送電コイルの入力電流  $I_1$  と、既存の受電コイルの出力電流  $I_2$  を VNA で測定し、それに基づいて伝送効率  $\eta$  と負荷電力  $P_L$  を換算値として算出した。受電コイルは図 8 に示す。受電コイルの測定諸元は表 3 に示す。

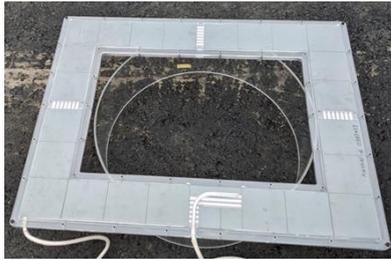


図 8 受電コイル

Fig. 8 Power receiving coil

表 3 受電コイルの寸法

Table 3 Dimensions of power receiving coils

Coil size	600x800mm
Number of turns	7
Pitch	11mm

入力電圧を 600V に設定し、伝送距離は 200mm および 250mm で測定を行った。スタイロフォームとアスファルト上で置いた場合の負荷を最大効率負荷、最大電流(リッツ線の許容電流の 38A になる負荷)と伝送効率が 90% になる負荷 3 パターンに設定し伝送特性を測定した。スタイロフォーム上に置いた場合、伝送距離 200mm の時の測定結果を表 4 に示す。伝送距離 250mm の時の測定結果を表 5 に示す。測定風景は図 9 に示す。

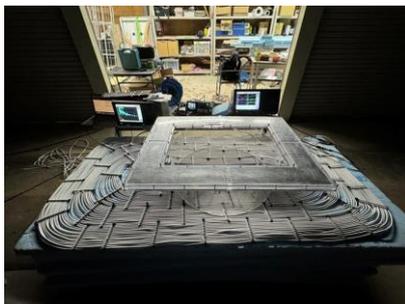


図 9 スタイロフォーム上での送受電実験風景

Fig. 9 Experimental view of power transmission and reception

on the styrofoam

表 4 スタイロフォーム上 200 mm に置いた場合の送受電

測定結果

Table 4 Results of power transmission and reception measurements when placed at 200 mm above the styrofoam

	負荷 [ $\Omega$ ]	$P_{out}$ [kW]	効率 [%]
最大効率	14.5	3.26	96.52
最大電流	125	18.13	85.38
効率 90%	80	14.07	90.05

表 5 スタイロフォーム上 250 mm に置いた場合の送受電

測定結果

Table 5 Results of power transmission and reception measurements when placed 250 mm above the styrofoam

	負荷 [ $\Omega$ ]	$P_{out}$ [kW]	効率 [%]
最大効率	10.1	3.22	96.16
最大電流	82	18.96	85.00
効率 90%	55	14.50	90.05

アスファルト上に置いた場合、伝送距離 200mm の時の測定結果を表 6 に示す。伝送距離 250mm の時の測定結果を表 7 に示す。測定風景は図 10 に示す。

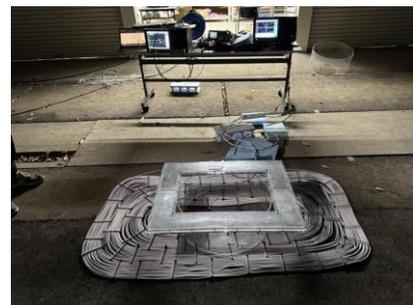


図 10 アスファルト上での送受電実験風景

Fig. 10 Experimental view of power transmission and reception on asphalt

表 6 アスファルト上 200 mm に置いた場合の送受電測定

結果

Table 6 Measured results of power transmission and reception

when placed 200 mm above asphalt

	負荷 [ $\Omega$ ]	$P_{out}$ [kW]	効率 [%]
最大効率	18	3.79	95.53
最大電流	147	15.79	82.66
効率 90%	76	12.25	90.08

表 7 アスファルト上 250 mm に置いた場合の送受電測定

結果

Table 7 Results of power transmission and reception measurements when placed 250 mm above asphalt

	負荷 [ $\Omega$ ]	$P_{out}$ [kW]	効率 [%]
最大効率	14.9	4.39	94.88
最大電流	101	16.43	83.25
効率 90%	53	12.20	90.00

表 5 と表 7 より、伝送距離 250mm でスタイロ上に設置した際の効率は 90.05% に達し、伝送電力は 14.50kW となることが分かる。また、アスファルト上に設置した場合でも、効率は 90.09% に達し、伝送電力は 12.29kW になる。これらの結果は、一般的な乗用車の電力要求を満たすレベルであることを示しており、ワイヤレス電力伝送システムが実用的な電力伝送効率および電力レベルを達成している。

#### 4. まとめ

本研究では走行中ワイヤレス給電における 85kHz 帯共振する 1 層オープン型コイルを提案する。シミュレーションと実験による層間距離に依存しない、コイルケースを使用せずに 1 層オープン型コイルの設計が成功した。

実験の結果、コイルケースを使用しない場合でも、伝送距離 250mm で換算値電力 12.2kW が得られ、伝送効率は 90% を達成した。今後は 1 層オープン型コイルを実際に地中に埋設し、ケースレスオープン型コイルの埋設が送電および受電性能にどのような影響を与えるかを検証する。

#### 謝辞

本研究は国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」における委託研究「走行中ワイヤレス給電のコイル埋設についての研究」の成果の一部である。

#### 文 献

- (1) 畑村耕一:「電気自動車(EV)のカーボンニュートラル走行を実現するための条件」, 自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 2 pp. 564-569 (2019-3)
- (2) Y. Li et al., "A New Coil Structure and Its Optimization Design With Constant Output Voltage and Constant Output Current for Electric Vehicle Dynamic Wireless Charging," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 9, pp. 5244-5256, Sept. 2019.
- (3) Z. Barsari, D.J. Thrimawithana and G. A. Covic, "An inductive coupler array for in-motion wireless charging of electric vehicles", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 9, pp. 9854-9863, 2021.
- (4) R. Tavakoli and Z. Pantic, "Analysis Design and Demonstration of a 25-kW Dynamic Wireless Charging System for Roadway Electric Vehicles", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Sep 2018.
- (5) V. Cirimele, M. Diana, F. Freschi and M. Mitolo, "Inductive Power Transfer for Automotive Applications: State-of-the-Art and Future Trends," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 5, pp. 4069-4079, Sept.-Oct. 2018
- (6) M. Kim and J. Choi, "Design of Self-Resonant Spiral Coils for Mid-Range, High-frequency Wireless Power Transfer Systems," 2022 Wireless Power Week (WPW), Bordeaux, France, 2022
- (7) 古里洗一, 居村岳広, 堀洋一“走行中ワイヤレス給電における 85 kHz 自己共振オープン型コイルを用いたコンデンサレス送電システムに関する初期検討”, 信学技報, Vol. 116, No. 238, pp. 25-30, 2016.
- (8) 高橋芳明, 畑勝裕, 居村岳広, 藤本博志, 堀洋一, “走行中ワイヤレス給電に向けたコンデンサレスフェライトレス 85 kHz 自己共振コイルの低抵抗化”, 電気学会論文誌 D, Vol. 139, No.8, pp. 734-742
- (9) 居村岳広, 高橋芳明, 畑勝裕, 藤本博志, 堀洋一, 塚本真也: フェライトレスかつコンデンサレスコイルを用いた走行中給電システムの性能と舗装耐久性評価に関する基礎検討, 自動車技術会 2019 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.20195206
- (10) 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, 2022, pp. 1-6