

走行中ワイヤレス給電における 水によるコイル特性悪化の基礎検討

学生員 川村 勇翔 非会員 山原 孝裕

正 員 居村 岳広 フェロー 堀 洋一（東京理科大学）

Basic Study on Degradation of Coil Characteristics due to Water in Dynamic Wireless Power Transfer

Yuto Kawamura, Takahiro Yamahara, Takehiro Imura, Yoichi Hori(Tokyo University of Science)

In dynamic wireless power transfer, the transmission coils are embedded inside the road pavement. In this process, the coils need to consider electrical characteristics, mechanical strength and cost. This paper focuses on the electrical properties, among which the effect of water is investigated. Two types of Litz wire were prepared: yarn-wound wire covered with thread and waterproof wire covered with a waterproof coating, to which water was quantitatively added and the electrical properties were evaluated. The results showed a Q-value of 92.1% and a 10% decrease in efficiency for the yarn-wrapped wire, and a Q-value of 83.7% and a 3.7% decrease in efficiency for the waterproof wire. Both Q-values and efficiencies improved when the current was passed through both wires with a bi-directional power supply and the accumulated water was evaporated.

キーワード：ワイヤレス給電，走行中ワイヤレス給電，コイル埋設，水

Keywords：wireless power transfer, dynamic wireless power transfer, embedded coil, water

1. 序論

日本では 2050 年にカーボンニュートラルの実現を目指しており、実現の手段として電気自動車（EV）の普及が進められている。しかし、日本国内における新車販売台数のうち電気自動車の占める割合は非常に低く、いまだ普及が進んでいるとは言えない。普及しない要因として、航続距離の短さ、充電時間、充電速度などが挙げられる。

これらの問題の解決方法として検討されているのが走行中ワイヤレス給電(DWPT)である。走行中ワイヤレス給電は、充電の手間をなくし、大容量のバッテリーを積む必要がなくなるため EV の低コスト化や航続距離を改善できる技術であり、各国で盛んに研究が行われている。

走行中ワイヤレス給電の方法として送電コイルを道路に埋設する必要があるが、実用化するためにはインフラとして通常の道路舗装と同等以上の耐久性やコイルの保護といった機械的特性、埋設によるコイルの特性悪化やコイルの特性維持といった電気的特性の両方が求められる。しかし、コイルを埋設することでコイルの電気的特性が悪化することが報告されている^{(1)~(8)}。悪化する要因の一つとして考えられるのが水であり、埋設されたコイルの内部に浸水したり、結露の発生が確認されている。

本論文では、水による影響をリッツ線を糸巻きした糸巻き線と防水被覆で覆われた防水線の二つを用いて、内部抵抗値、インダクタンス、 Q 値、最大効率で比較した。

2. 実験手法

実験構成として、DWPT の回路方程式は SS 方式とし、周波数は DWPT で使用される 85kHz で一定とした。内部抵抗値、インダクタンス、 Q 値、最大効率を測定した。測定には LCR メータの LCR-6300 を使用した。

SS 方式の最大効率は、結合係数 k と送電コイル Q_1 、受電コイル Q_2 から求められ、(1)式のように表すことができる。また、結合係数 k は、オープンショート法から導出した。LCR メータを用いたオープンショート法は Fig.3 の様に送電コイルの上に受電コイルを配置し、受電コイル側がオープンの時とショートの際の送電コイルのインダクタンスをそれぞれ測定し、(2)式に代入することで結合係数を求めることができる。また、 Q 値は内部抵抗値 R 、インダクタンス L から(3)式で求めることができる。

糸巻き線と防水線で送電コイルを作成した。(Fig.1,2) 送電コイルで使用したリッツ線は素線径 0.1mm、素線数 2500 本、防水被覆の厚みは 0.5mm である。糸巻き線と防水線が

らできた送電コイルはともに 1700mm×600mm、フェライト入りリッツ線コイルの受電コイルは 800mm×200mm である。送電コイルと受電コイルの間のエアギャップは 200mm とし、Fig.3 の様に設置した。実験時の室温は 23.7~24.4℃であった。また、Fig.3 に写っている秤を 10 個用いて含水量を測定した。この秤は計測範囲が、0~1000g の時は最小表示が 0.5g、1000~2000g の時は 1.0g、2000~3000g の時は 2g となる精度であった。秤がコイルに影響しないように、スタyroを間に挟んだ。蒸発前後の重量を 3 回計測し平均値で比較した。試料としては水道水を使用した。定量的に 100g ずつ追加し、水が入らなくなるまで加えた。さらに、電気的特性の改善を確認するために、加えた水を蒸発させ、双方向電源を用いて蒸発させた。双方向電源で共に入力直流電流を 90A とし、消費電力値は、糸巻き線で約 0.432kW、防水線で約 0.225kW となった。

$$\eta_{MAX} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (1)$$

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{short}}{L_{open}}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (3)$$

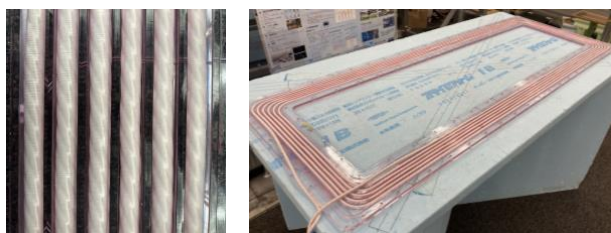


Fig.1 糸巻き線



Fig.2 防水線



Fig.3 実験の様子

3. 実験結果

(3・1) 糸巻き線

結果は以下のような Fig.5~8,10、Table1,2 となった。Table.1.では糸巻き線の含水量と Surface-water Length(SWL) の関係を示している。特性悪化を評価する上で、本論では、Fig.4 の様に、コイルの表面に溜まった水を長さとしてみたものを SWL と定義し、着目した。また比率については、コイルの全長に対する SWL の割合を示している。コイルの全長は 25,860mm であった。SWL が特性悪化に関わる考察は後に記載する。

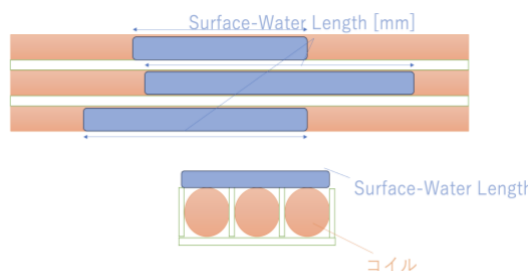


Fig.4 SWL のイメージ図

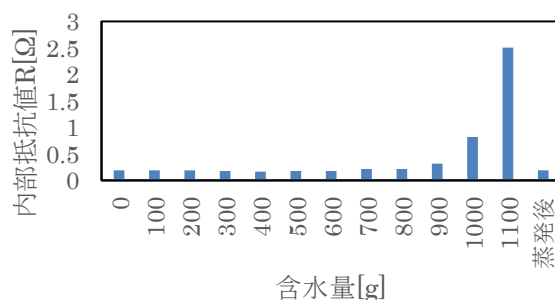


Fig.5 内部抵抗値R

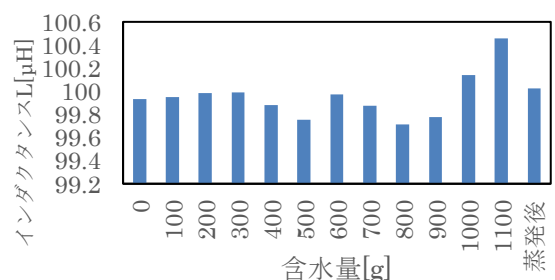


Fig.6 インダクタンスL

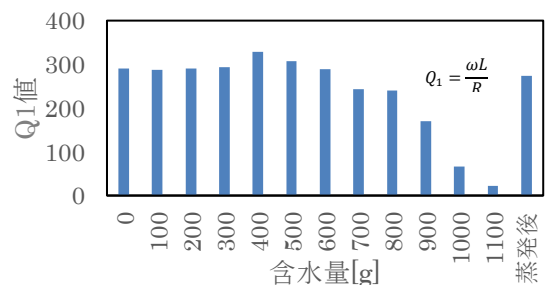


Fig.7 送電コイルQ1値

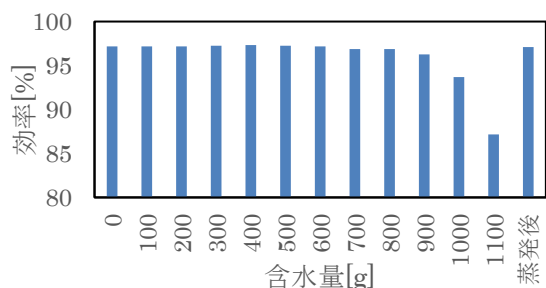


Fig.8 最大効率

Table.1 含水量と waterloop の関係(糸巻き線)

含水量	SWL(比率)	含水量	SWL(比率)
0 g	0mm(0%)	600g	0mm(0%)
100g	0mm(0%)	700g	0mm(0%)
200g	0mm(0%)	800g	0mm(0%)
300g	0mm(0%)	900g	6,580mm(25.4%)
400g	0mm(0%)	1000g	11,970mm(46.3%)
500g	0mm(0%)	1100g	19,140mm(74.0%)
600g	0mm(0%)	蒸発後	0mm(0%)

含水量が 0g から 1100g に変化したとき、Fig.6 よりインダクタンスの変化率は 0.524%だったので、共振ずれはなかったと言える。またこの時、 Q_1 値は 92.1%低下した。さらに、Fig.8 と Table.1.からコイル上に含水量が 900g あたり、すなわち SWL ができ始めてから効率が低下し始めたことを確認した。糸巻き線は水を吸収しやすい構造だが、800g ぐらいまで水を含んでも最大効率にはあまり影響していないことからコイル表面上に水が溜まってしまふことが最大効率の低下に影響するのではないかと考えられた。

Fig.9 では蒸発実験の前後でのコイルの様子を示している。コイル上の水が見やすい様に赤色に着色した。尚、着色剤による影響はなかった。Table.2 を見ると、蒸発実験によってコイル上に溜まっていた水が完全に蒸発したことを示している。これにより、Fig.7,8 からわかる様に Q_1 値、最大効率が含水量が 0g の時の推移に戻ったことが確認できた。さらに、Fig.10 より送電コイルと同様に受電コイルも水が 1100g 入ったことにより、 Q_2 値が 45.7%低下した。蒸発後は Q_2 値は回復した。このことから、送受電間に水が溜まることで双方のコイルに影響することがわかった。



(a)蒸発前(1100g)



(b)22.5 時間後蒸発

Fig.9 糸巻き線蒸発実験前後

Table.2 蒸発実験結果(糸巻き線)

	3 回平均
蒸発前重量[g]	15,755
蒸発後重量[g]	14,640
差分[g]	1,115

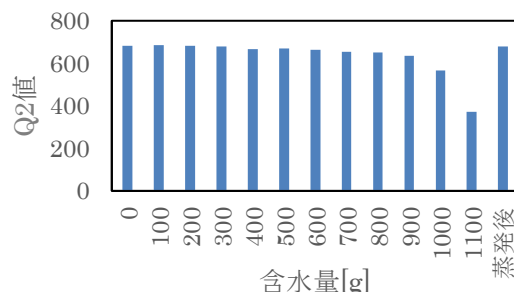


Fig.10 受電コイル Q_2 値

〈3・2〉防水線

防水線による実験の結果は以下の Fig.11~14,16、Table3,4 のようになった。糸巻き線同様に、防水線も含水量を 0g から 1000g へ増加させた時、インダクタンスの変化率は 1.08%だったので、共振ずれはなかったと言える。(Fig.12) また、 Q_1 値は 83.7%低下した。含水量が 300,400g あたりから SWL が生じ始めたので、 Q_1 値と最大効率は低下し始めた。また、SWL の割合が大きくなればなるほど、最大効率の低下も著しくなった。(Fig.13,14)さらに、Table.4.からわかる様に糸巻き線同様に完全に蒸発し、蒸発後は Q_1 値、最大効率がともに含水量 0g と同様の推移まで回復した。

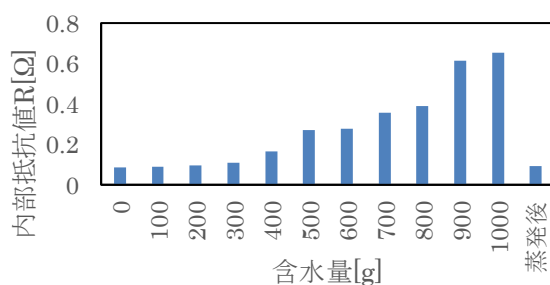


Fig.11 内部抵抗値R

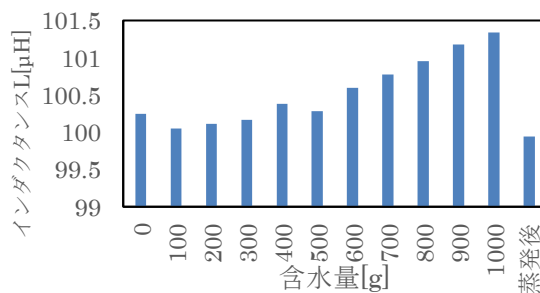


Fig.12 インダクタンスL

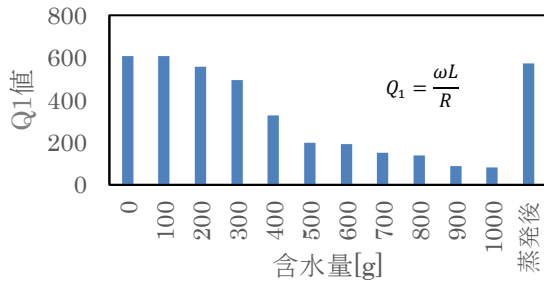


Fig.13 送電コイル Q_1 値

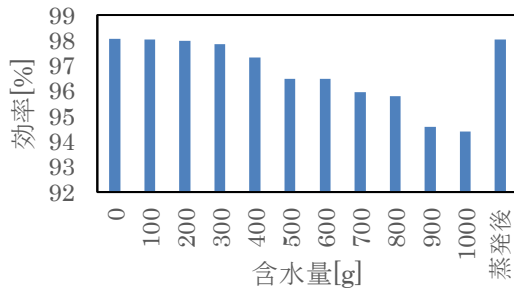


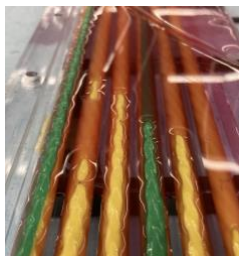
Fig.14 最大効率

Table. 3. 含水量と waterloop の関係(防水線)

含水量	SWL(比率)	含水量	SWL(比率)
0 g	0mm(0%)	600g	2,520mm(9.74%)
100g	0mm(0%)	700g	4,030mm(15.6%)
200g	0mm(0%)	800g	4,580mm(17.7%)
300g	225mm(0.87%)	900g	5,820mm(22.5%)
400g	720mm(2.78%)	1000g	7,670(29.7%)
500g	880mm(3.40%)	蒸発後	0mm(0%)

Table. 4. 蒸発実験(防水線)

	3 回平均
蒸発前重量[g]	16,168
蒸発後重量[g]	15,105
差分[g]	1,063



(a)蒸発前(1000g)



(b)20 時間蒸発後

Fig.15 防水線蒸発実験様子

受電コイルは、水が 1000g 含まれると Q_2 値が 14.34%低下した(Fig.16)。蒸発後は Q_2 値が回復した。糸巻き線同様、送電コイルの表面上、かつ送受電間に水が溜まることによって、双方のコイルの特性が悪化することがわかった。

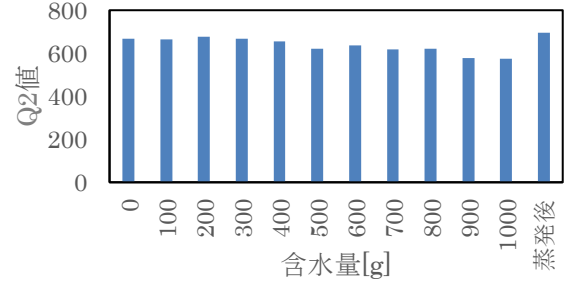


Fig.16 受電コイル Q_2 値

4. 結論

これらの実験から、糸巻き線は、水が 1100g 増えたことで、送電コイル Q_1 は 92.1%、受電コイル Q_2 は 45.7%低下し、最大効率は 10.01%低下した。防水線は、水が 1000g 増えたことで、送電コイル Q_1 は 83.7%、受電コイル Q_2 は 14.3%低下し、最大効率は 3.66%低下した。このことから、防水皮膜は効率低下の抑制に寄与することがわかった。しかし、これはコイル内に浸水するのを防ぐというより、あくまで効率低下の原因は送電コイルの表面上、すなわち送受電間に水が溜まること、コイルの表面に溜まった水の長さである SWL が発生することで、 Q 値と最大効率が低下することがわかった。さらに、SWL を無くすことで、 Q 値、最大効率が改善されることがわかった。

文 献

- (1) 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.
- (2) R. Ahmad, V. Kumar, M. Bilal and S. Kumari, "Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) for Charging Application of Electric Vehicle," 2022 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES), SRINAGAR, India, 2022.
- (3) Cirimele, V.; Torchio, R.; Virgillito, A.; Freschi, F.; Alotto, P. Challenges in the Electromagnetic Modeling of Road Embedded Wireless Power Transfer. *Energies* 2019.
- (4) 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.
- (5) Koki Hanawa, Takehiro Imura, Yoichi Hori and Nagato Abe ,
- (6) "Proposal of Coil Embedment Method by Pouring Resin Materials for Dynamic Wireless Power Transfer", IEEE Wireless Power Week Conference (WPW 2022), Bordeaux, France, July 2022.
- (7) Takehiro Imura, Koki Hanawa, Kanta Sasaki and Nagato Abe, "Coil Performance and Evaluation of Pavement Durability of Dynamic Wireless Power Transfer System using Ferrite-less and Capacitor-less Coil for Road Construction Methods," 5th International Electric Vehicle Technology Conference (EVTeC2021), May. 2021
- (8) Z. Feng, O. Shimizu, H. Sumiya, S. Nagai, H. Fujimoto and M. Sato, "Influence of Contamination Between Receiver Coil and Embedded Transmitter Coil for Dynamic Wireless Power Transfer System," 2021 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), San Diego, CA, USA, 2021, pp. 1-6.