

非接触給電コイルにおける導体の近接効果による損失の検討

柏木 隆行* 長谷川 均** 加藤 佳仁*
坂本 泰明* 浮田 啓悟*

Study of the Loss by the Proximity Effect of the Conductor
in Contactless Power Supply Coils

Takayuki KASHIWAGI Hitoshi HASEGAWA Yoshihito KATO
Yasuaki SAKAMOTO Keigo UKITA

The contactless power supply system has high degree of safety and a feature of being maintenance free, because the current-carrying part is insulated and has no mechanical contact. On the other hand, transmission efficiency is low and its improvement is very important. The losses of the system mainly proceed from the power converters and the electrical power supply coils. In this paper, we focus on the loss caused by the proximity effect of the conductor of the power supply coils and discuss the effect of the kind of wire of the coils and the shape of the coils.

キーワード：非接触給電，コイル，リッツ線，近接効果

1. はじめに

これまで移動体への電力の供給は、通常、端子やブラシなどを用いた接触給電で行われてきた。電動歯ブラシや、携帯電話といった小規模装置では非接触給電による電力供給も実用化されてきたが、大電力が必要となる産業用途ではまだ一般化していない。

非接触給電による電力供給は、課電部の露出が無く、感電・漏電の可能性が低く、また接触部分が無いため摩擦等が無く、メンテナンスコストの低減が図れるといった特長がある。一方で空間を通してエネルギーの授受を行うため、接触給電に比べエネルギー伝送密度が低く、更に電力の変換等のために伝送効率が低下してしまうという課題がある。

近年、鉄道車両ではハイブリッド気動車やバッテリー電車等、蓄エネルギー媒体を持つ車両が開発されているが、蓄エネルギー媒体の質量は重く、搭載量の低減が望まれる。バッテリー電車では外部からの充電が必要となるが、非電化区間での充電方法にはなお検討の余地がある。これらの車両の運行中に外部から給電が出来れば、搭載する蓄エネルギー媒体を削減することが可能となる。給電方法として、駅部でのパンタグラフを用いた充電なども検討されているが、非接触給電を適用すること

で多頻度かつ容易な充電が可能となり、蓄エネルギー媒体搭載量の更なる削減も期待できる。

非接触給電の方式として、変圧器方式、発電機方式、磁界共鳴方式などがあげられるが、鉄道車両に必要とされる大電力を静止・移動状態を問わず安定して供給するには、現状では変圧器方式の採用が有力である。変圧器方式はトランスを空間で分離した構成をとるため、その低い結合を補うために給電コイルに高周波電流を通電して電力の授受を行う。この構成において、損失の大半は電力変換器自身と給電・集電コイルの銅損として生じる。電力変換器については、炭化珪素 (SiC) を用いた素子が実用化され、損失低減の目途が立ち始めている。一方、コイルにおける銅損は、高周波電流を通電するために、直流を通電した場合よりも大きな抵抗 (交流抵抗) となることから増大し、その低減は重要な課題である。また、鉄道へ適用する場合の特徴として、給電コイルの近傍にレールが存在することによる渦電流損の存在も無視できない。

前報¹⁾では全体概要やコイル構成の得失、主にレールに発生する交流損失評価の概要について報告したが、本論文では非接触給電コイル導体そのものに発生する損失について深度化を行った。すなわち非接触給電に用いるコイルで効率に関して課題となる交流抵抗増加因子に着目し、特にコイルを構成する上で影響の大きい近接効果に焦点を当て、損失の原因と損失を低減する素線構成やコイル構成について報告する。

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

** 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

2. 表皮効果と近接効果

本章では非接触給電コイルで生じる交流抵抗を評価する上で重要な二つの現象である、表皮効果と近接効果について述べる。

2.1 表皮効果

高周波電流を導体に通電する場合、導体を流れる電流による磁界の時間変化により、導体中の電流分布に偏りが生じる。断面が円形の導体の場合、この電流分布は導体表面に偏る（図1）。この時、電流分布が存在する領域を表皮厚と言い、円形導体では式(1)で表される²⁾。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (1)$$

ここで δ : 表皮厚 (m), f : 変動磁界の周波数 (Hz), μ_0 : 導体の透磁率 (H/m), σ : 導体の導電率 (S/m) である。表1に20℃の銅導体（導電率 59.5×10^6 S/m）に通電した場合の表皮厚を示す。図1から判るように表皮厚が導体半径以下となると、表皮効果による電流分布の偏りの影響が大きくなる。

表1 銅導体の表皮厚

周波数 (kHz)	表皮厚 (mm)
5	0.923
10	0.652
20	0.461
50	0.292
100	0.206

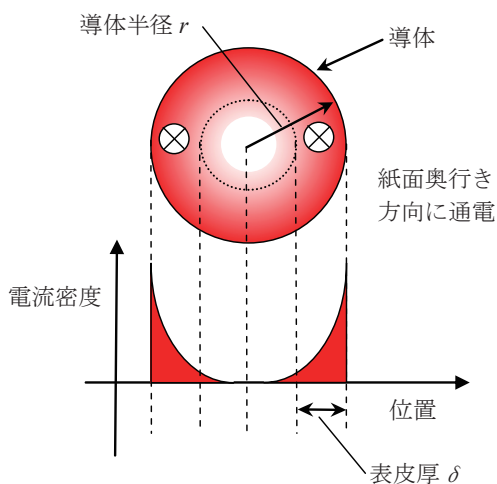


図1 表皮効果

このように表皮効果では、自ら作る磁界により一つの導体（素線）の外周と中心部で電流密度が異なることにより、交流抵抗が増加することになる。

2.2 近接効果

表皮効果は通電している導体自身の電流が作る磁場に

よる影響で生じる現象であるが、通電導体の周辺に導体が存在する場合、通電導体を作る磁場は周辺の導体にも鎖交し、渦電流を生じる。この時生じる渦電流に対しても2.1節で述べた表皮効果と同様に、電流は導体全面を流れず導体の両側に偏って流れることになる（図2）。複数の導体から構成される電線（撚り線など）では、通電した導体同士が近接し、自身を流れる電流による表皮効果と近接する導体に生じる渦電流による近接効果の両者が存在し、流れる電流は片側に偏ったものとなり、結果として交流抵抗が増加する（図3）。

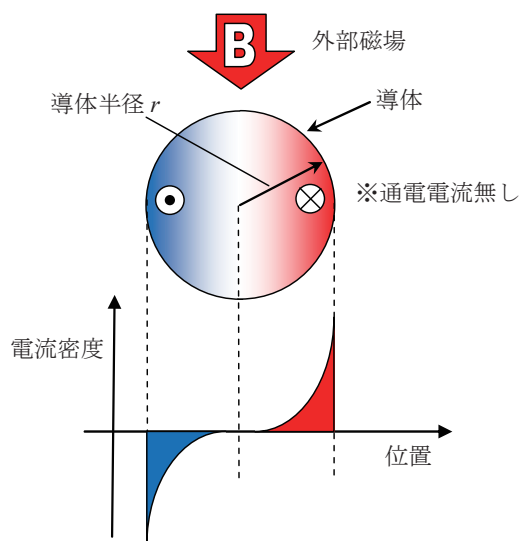


図2 近接した通電導体からの影響

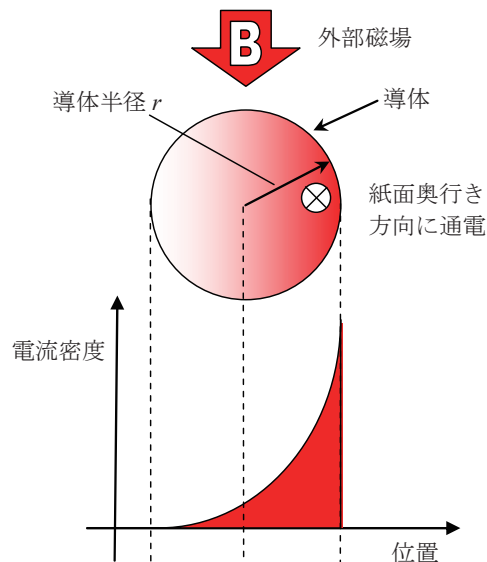


図3 導体における電流分布

3. 想定する非接触給電装置と交流抵抗

鉄道車両を対象とした非接触給電では、必要な給電電力は数十～数百 kW クラスとなり、それに応じて給電側・集電側のコイル導体総断面積が決定される。一例として、

表2 検討モデル

集電電力	50kW
周波数	10kHz
対向面積	800mm (まくらぎ方向) × 3000mm (レール方向)
メカニカルクリアランス	75mm
コイル形状	8の字コイル

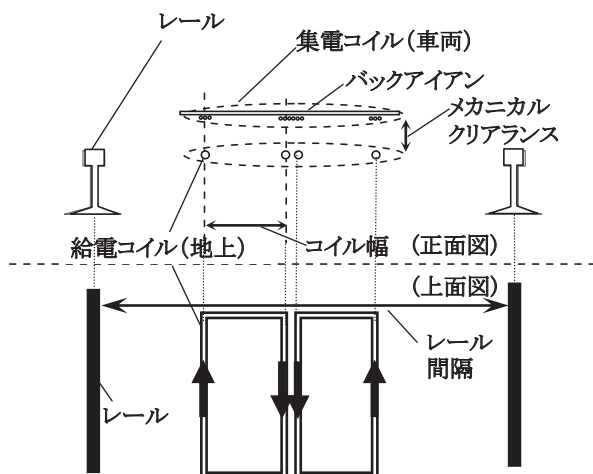


図4 コイル配置 (8の字コイル)

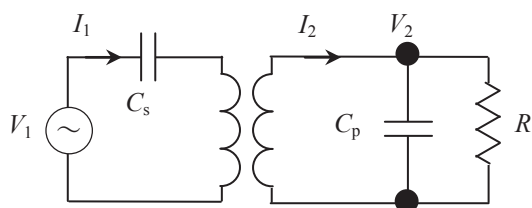


図5 非接触給電回路構成

鉄道用としては小規模であるが、50kWクラスの非接触給電の例を表2、図4、5に掲げる¹⁾。

表2のように集電電力と周波数および給電コイルと集電コイルの対向面積を決めると、必要な導体量が定まる。上記の検討モデルでは、電源電圧や共振コンデンサの選定にもよるが、必要な導体総断面積は60～240mm²程度と見積もられる。

このような線材を用いる場合の交流抵抗について、以下に検討する。

表皮効果については、自身の電流による影響であるため、2.1節で述べた表皮厚以下に素線導体半径を抑えれば表皮効果による交流抵抗増加は抑えられることがわかる。他方、近接効果については、外部磁界の影響により生じるものであり、導体総断面積が増加すると外部磁界も増加し、より大きな影響を及ぼすと考えられる。

以下に簡易的に近接効果の大きさを見積もる式を導入する。導体断面に一樣な電流が流れる場合の抵抗(直流抵抗)と近接効果による抵抗増分(交流抵抗)が同等と

なる素線半径を定めるものである。

$$\frac{1}{\pi r^2} = \frac{\sigma \mu_0 f}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

(r : 導体総断面積を円形とした場合の半径 (m), σ : 導体の導電率 (S/m), μ_0 : 導体の透磁率 (H/m), f : 周波数 (Hz), n : 総導体数)

素線半径を r' (m) として

$$r' = \frac{r}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

であるから、

$$r' = \frac{1}{\pi r \sigma \mu_0 f} \quad (4)$$

となる。例えば周波数 f を一定として総導体半径 r を2倍にすると、交流抵抗を同じにするためには素線半径を1/2にする必要があることを示している。

上記は給電電力が小さく導体総断面積が小さい場合に問題にならなかった近接効果が、給電電力の増加およびそれに伴う総導体半径の増加とともに、顕在化してくることを示していると考えられる。

これまで小規模断面での交流抵抗の検討は行われている³⁾が、導体総断面積を大きくとることを含め、各種条件を変化させた場合の近接効果の影響について、電磁界解析を用いて評価を行うこととする。

4. 電磁界解析による近接効果の評価

本節では近接効果の評価に重点を置き、電磁界解析を用いて計算した交流抵抗を指標として評価を行う。解析ソフトはANSYS社のANSYS Emag (Ver. 12.1, Ver. 14.0)を使用した。解析環境の都合上2種類のバージョンを用いて解析したが、今回の解析では両者の結果に差がないことを確認している。解析条件は下記の通りである。

- ・ 導体要素 (メッシュ) 寸法: 一辺が表皮厚の1/3以下となるように設定
- ・ 導体の導電率: 59.5×10^6 S/m (20°C銅導体を想定)
- ・ 電流条件: 各素線に同電流通電
- ・ 解析条件: 2次元無限長線形調和解析
- ・ 総導体外形状: 六角形 (円形模擬)

なお、この解析では、各素線には渦電流は生じるが、各素線のインピーダンスは等しく (即ち十分に縫られている)、各素線間は絶縁されている (リッツ線) とした。解析精度については、前報¹⁾で実験値等との比較を行っており、十分な精度を有すると考えられる。

交流抵抗の評価は、直流抵抗に対する交流抵抗の比である抵抗比 Rn として行う。即ち、交流抵抗が0の場合、 $Rn=1.0$ となる。

近接効果については3章で述べたような簡易推定式はあるものの、実機的设计や製作においては、複雑な導体

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

構成（占積率，素線導体形状，導体外形，給電コイルに対する2次コイルの効果，鉄心の影響）を考慮するためにこのような電磁界解析が必須である。

4.1 素線直径の影響

交流抵抗に最も影響のある素線直径の影響を評価する。導体総断面積を一定とし，素線直径を変化させて解

表3 解析パラメータ

通電周波数 (Hz)	1 (直流模擬), 5k, 10k, 20k, 50k, 100k
導体総断面積 (mm ²)	約9
素線直径 (mm)	0.1, 0.18, 0.26, 0.32, 0.45, 0.6, 0.8, 1.3, 2.0
占積率 (%)	75.0

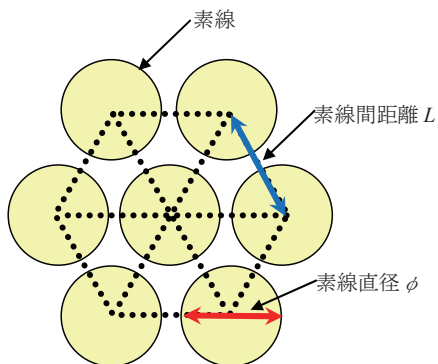


図6 素線配置 (6角形)

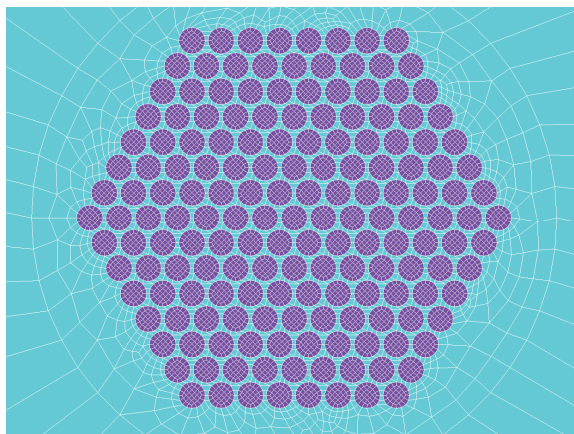


図7 解析モデル (素線直径 0.26mm)

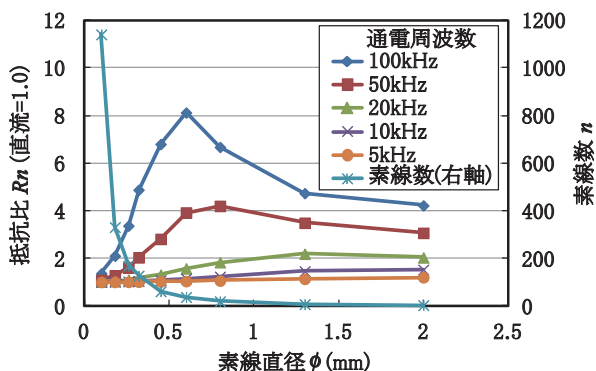


図8 素線直径と抵抗比

析を行った。素線数は素線直径が小さくなると増加することになる。解析パラメータを表3に示す。計算機性能の制約により，小さい導体総断面積をモデル化しているが，実規模寸法での検討は次節にて行う。解析モデルでは，図6に示すように素線を正三角形の各頂点に配置し，導体全体の外形が，対称性を持つ円形に近い形状となる六角形となるように素線を配置した。例として素線直径0.26mmの解析モデルを図7に示す。占積率は素線間距離Lにより決定している。解析結果を図8に示す。

これによると素線直径が細くなると抵抗比が1に収束していく一方，素線直径の増大に伴う交流抵抗増加があるピークを持つことがわかる³⁾。2章で述べた通り，表皮厚を超える半径を持つ導体では，表皮厚の影響が大きくなり，電流流路が固定されることで近接効果の影響が小さくなることわかる。

実際の素線直径を決定する場合は，上記極大値をとる素線直径よりも十分に細くする必要がある。

また，周波数10kHzでの使用を考えると，この解析のような小断面導体では，表皮厚の影響を受ける表皮厚の倍程度の素線直径でも交流抵抗の影響は少ないことがわかる。

4.2 導体総断面積の影響

実機への適用を考慮すると，電流密度の制約もあり，導体総断面積は大きくなる。本節では導体総断面積を増やした場合の交流抵抗について検討する。表4に解析パラメータを示す。素線本数を増やすことで導体総断面積を変化させている。周波数は実機での適用を検討している10kHzとした。

解析結果を図9に示す。なお，この解析では，導体本

表4 解析パラメータ

通電周波数 (Hz)	1 (直流模擬), 10k
素線直径 (mm)	0.1, 0.18, 0.26, 0.45, 1.3
占積率 (%)	75.0
素線本数	1 ~ 1141

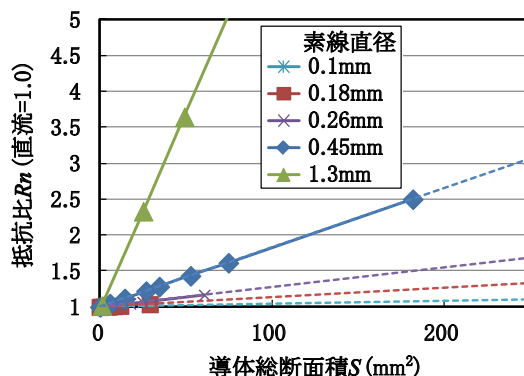


図9 導体総断面積と抵抗比

数を増やす形で導体総断面積を増やして計算しているため、素線太さによって、解析出来る範囲が異なっている。抵抗比は導体総断面積に比例しており、点線部は解析結果を導体総断面積比例で外挿したものである。このことは(2)～(4)式からも導出できる。

4.1節の解析では10kHzであれば素線直径の影響は少なかったが、導体総断面積を増やしていく場合、素線直径による影響は顕著となることがわかる。すなわち導体総断面積に対する抵抗比の変化が、素線直径によって決定されており、小断面積では、抵抗比そのものが小さく問題とならなかったものが、導体総断面積の拡大に伴い顕在化する。使用を検討している200mm²程度の総断面積において、交流抵抗を直流抵抗と同等に抑えようとすれば、0.26mm程度以下の素線直径に抑える必要があることがわかる。

4.3 占積率の影響

実際の導体では絶縁のための被覆があり、占積率は素線太さにより範囲が限定される。円形素線の場合、被覆無し(=最大)の占積率は図6で素線間距離L=素線直径φの時に相当し90%であり、例えば直径0.1mmの1種エナメル線を素線として用いる場合、最低被覆厚さ9μmと規定されており⁴⁾、この時の占積率は65%となる。実際の導体では縫りなどからこれらの数値よりも低い値となる。ここでは占積率を変化させた場合の交流抵抗変化について述べる。解析パラメータを表5に示す。占積率は4.1節で述べた通り素線間距離を変化させ、導体総断面積は一定とした。結果を図10に示す。

表皮厚に比較して十分小さい直径の線材では占積率は抵抗比にそれほど大きな影響を与えないことがわかる。表皮厚より大きい直径の線材では、表皮効果により導体中の電流分布が偏っており、導体同士が近接することで

表5 解析パラメータ

通電周波数 (Hz)	1 (直流模擬), 10k
導体総断面積 (mm ²)	約 9
素線直径 (mm)	0.18, 0.26, 0.45, 1.3
占積率 (%)	75.0, 53.7, 40.3, 31.4, 20.6

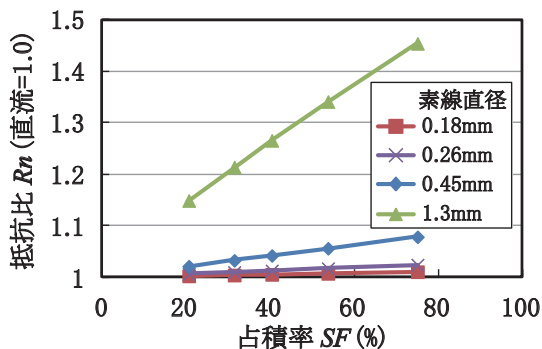


図10 占積率と抵抗比

この偏り方が変化するため抵抗比が大きくなると考えられる。ただし4.1節で述べた素線直径の影響に比べるとその変化は小さい。

4.4 形状の影響

近接効果は磁界分布の影響を受けるため、導体外形の影響を受ける。これまでの解析は他の特性を検討するために、対称形である六角形配置を用いたが、ここでは形状による影響を検討する。これまでの素線配置と異なり、図11に示す矩形配置を用いる。ここで横幅に対する縦幅の比を縦横比として、これを変化させた解析を行う。縦横比0.64の解析モデルを図12に示す。解析パラメータを表6に示す。結果を図13に示す。

縦横比を1(正方形)から小さくしていく(扁平にしてい)につれて、交流抵抗が減少していくことがわかる。これは扁平にするにつれ導体に鎖交する磁界が減少するためである。扁平にすることは機械ギャップを一定としたときに給電コイル-集電コイル間の電磁ギャップを小さくする方向に働く一方、あまり扁平にし過ぎる

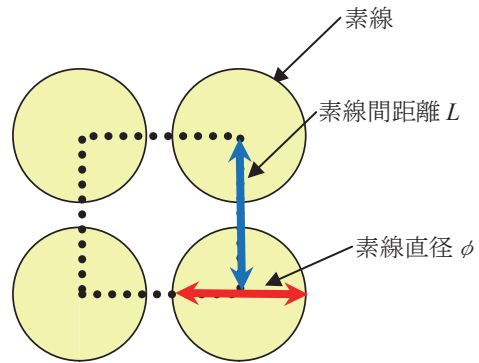


図11 素線配置(矩形)

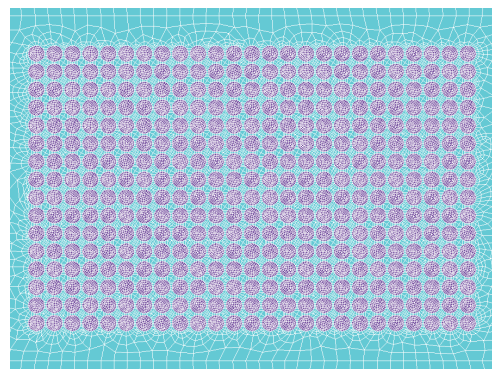


図12 解析モデル(縦横比0.64)

表6 解析パラメータ

通電周波数 (Hz)	1 (直流模擬), 5k, 10k, 20k
導体総断面積 (mm ²)	約 60
素線直径 (mm)	0.45
占積率 (%)	65.0
縦横比	1.0, 0.64, 0.25, 0.16, 0.06

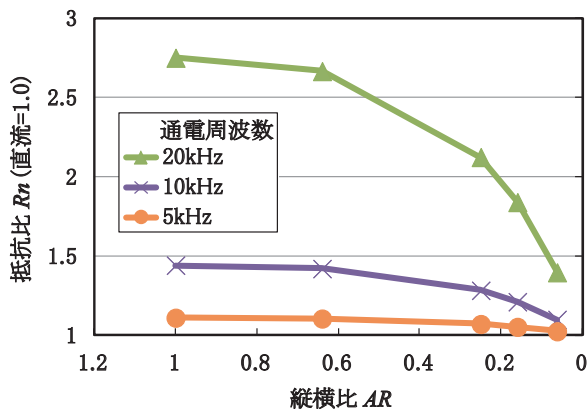


図 13 導体総断面積の縦横比と抵抗比

とコイル窓面積の縮小による主磁束の減少につながるため、両者のバランスを取ることが重要となる。

5. 結論

鉄道車両への搭載を検討している非接触給電装置に用いるコイルについて、効率において重要な因子となる交流抵抗増加因子、特に近接効果について検討した。その結果、

(1) 給電電力が増し導体総断面積が増加するにつれ、表

皮効果よりも近接効果の影響が顕著となり、導体総断面積に比例して抵抗比が増加する。

(2) 検討モデルから想定される素線直径としては、10kHz 給電の場合 0.26mm 程度以下とする必要がある。

(3) 総導体形状（外形）を扁平にすれば、交流抵抗増加の抑制に寄与する。

などを電磁界解析により明らかにした。

今後、これらの検討をもとに構内試験線での給電試験実施に向けて検討を進めていく所存である。

文献

- 1) 柏木隆行, 長谷川均, 坂本泰明, 加藤佳仁: 在来方式鉄道用非接触給電装置に用いるコイルの構成, 鉄道総研報告, Vol.26, No.5, pp.41-46, 2012
- 2) W.H. ヘイト: 工学系の応用電磁気学, マグロウヒル, pp.72-78, 1992
- 3) 水野勉, 神谷旭, 志村祐介, 飯田和剛, 山本大輔, 宮尾直樹, 笹平秀昭: リッツ線の素線数が交流抵抗に与える影響に関する検討, JSAEM Journal, Vol.18, No.3, pp.300-305, 2010
- 4) JIS C3202 エナメル線