

非接触給電システムの鉄道車両への適用

浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

主任研究員 柏木 隆行

1. はじめに

ハイブリッド気動車やバッテリートレインなど蓄エネルギー媒体を持つ車両が実用化されつつある。蓄エネルギー媒体の車両重量に占める割合は大きいですが、多頻度の充電を行う事で搭載量の削減が図れる。また、これらの車両に非接触給電を適用することで、容易かつ安全に多頻度の充電を行うことが可能になる。一方で非接触給電は接触給電に比較し、一般的に損失が大きいという課題があり、この低減が必須となる。ここでは、非接触給電を鉄道に適用する際に損失低減を図る構成について紹介する。

2. 非接触給電

2.1 鉄道への適用

非電化区間の車両では、動力として主に内燃機関が用いられている。近年、地球環境問題に対する意識の高まりを受けて、内燃機関の高効率利用を目指したハイブリッド気動車や、更には内燃機関を搭載しないバッテリートレインが実用化された。しかし、これらの車両に搭載される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。バッテリートレイン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間欠的にでも外部から電力を供給できれば、蓄エネルギー媒体の搭載量低減が可能となる。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る。また、課電部の露出がないため安全性も高く、接触部が無いため保守も容易である。モデルケースとしては、2両編成（1M1T）の車両に300kWの給電を行う事を想定している。

2.2 方式の検討

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。その得失と事例を表1に示す。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。また、変圧器方式は給電・集電コイル間の位置ずれにより給電能力に影響を及ぼすが、レールで左右方向が拘束されている鉄道はその点では有利である。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内部の素子による損失と給電・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

表1 非接触給電の方式と得失および事例

方式	長所	短所	事例
変圧器	大容量給電可	遠方給電不適	電動バス、携帯電話等多数
発電機	大容量給電可	静止時給電不可	JR マグレブ、トランスラピッド
磁界共鳴	(変圧器方式より) 遠方給電可	大容量給電不適	MIT 伝送実験、自動車

化珪素（SiC）を用いた素子が実用化され、損失低減の目処が立ち始めている。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、建築限界と車両限界を考慮すると、給電コイル・集電コイル設置位置として車体下部で相対させる方法が最も有力と考えられるが、その場合、給電コイル近傍にレールが存在することによる損失の存在も無視できない。

3. 非接触給電装置のコイルにおける損失の検討

3.1 コイル導体の損失

変圧器方式では電力を高周波電流に変換してコイルに通電する。導体に高周波電流を通電すると、表皮効果や近接効果により直流を通電した場合よりも大きな抵抗（交流抵抗）となることから銅損が増加する。

表皮効果は通電電流自身の磁界により導体内に電流分布の偏りが起きる現象である。導体中で電流が分布する領域を表皮厚と言い、円形導体では式(1)で表される¹⁾。

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

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)であり、10kHzの交流を20℃の銅導体に通電した場合、約0.7mmとなる。表皮厚よりも導体半径が大きいと、導体中の電流分布が一様ではなくなり、銅損が増加する。

一方、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が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。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。

一般にこれらの影響による銅損を低減するために、細い絶縁被覆付き素線を集合させたリッツ線がコイルの導体として用いられる（図1）。

3.2 電磁界解析による損失の少ない導体の検討

リッツ線として用いられる素線の各種数値をパラメータとして電磁界解析を行い、交流抵抗について評価を行った²⁾。交流抵抗の評価は、式(2)で表される直流抵抗に対する高周波を通電した導体の抵抗の比である抵抗比 Rn として行う。

$$Rn = \frac{\text{交流抵抗}(\Omega)}{\text{直流抵抗}(\Omega)} \dots\dots\dots(2)$$

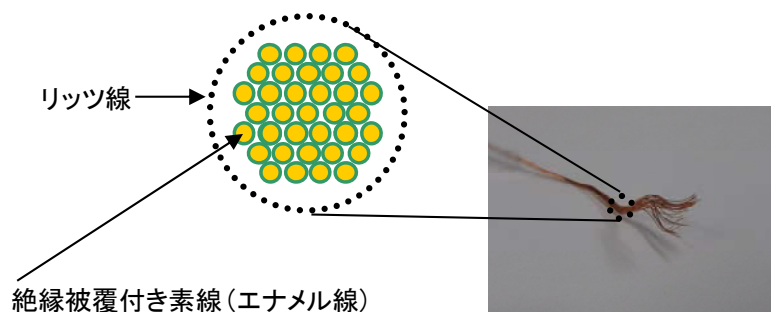


図1 リッツ線

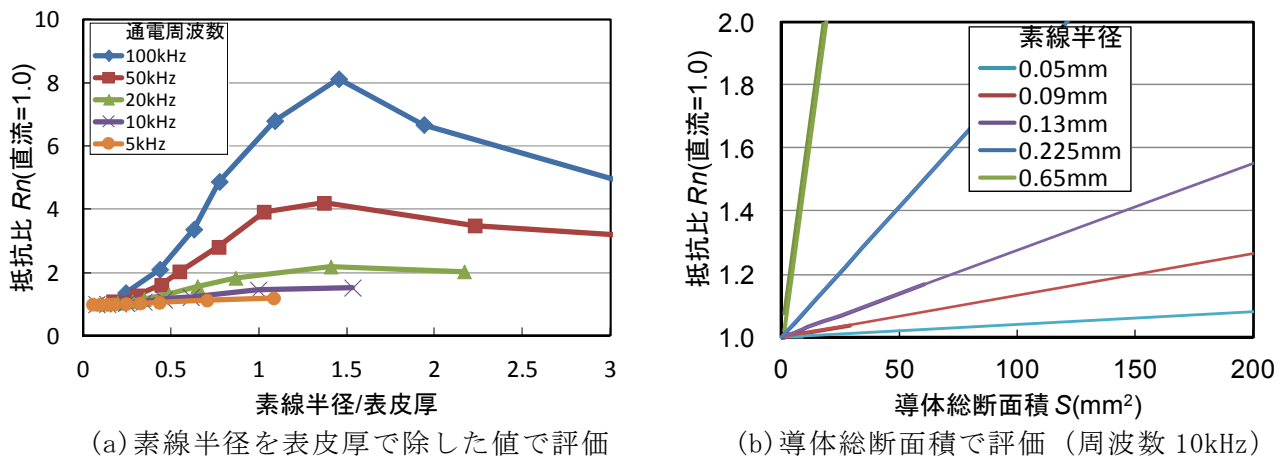


図 2 交流抵抗解析結果

即ち、直流抵抗と交流抵抗の差がない場合、 $R_n=1.0$ となる。解析は素線半径、導体総断面積などをパラメータとして実施した。表皮厚の影響を検討するために、「素線半径を表皮厚で除した値」をパラメータとして評価した解析結果を図 2(a) に、給電する電力量に関係する、導体総断面積の影響を評価するために「導体総断面積」をパラメータとした解析結果を図 2(b) に示す。これによると、表皮厚の 1.5 倍程度の素線半径で抵抗比は極大を取り、抵抗比を低下させるには素線半径をそれよりも更に小さくする必要があることがわかる。一方、導体総断面積と抵抗比は一次的な関係を有し、その傾きが素線半径で決まることがわかる。いずれも細い導体を採用することで交流抵抗は低減するが、コストの観点から必要以上に細い線材を採用することはできない。鉄道の場合、大容量の給電が必要となるため導体総断面積が大きくなり、近接効果の影響が顕著になることや、次節で述べる通り通電周波数として 10kHz を採用するため、素線として半径 0.09mm のリッツ線を採用することとした。

3.3 コイル構成

2.2 節で述べた通り、車両におけるコイルの設置位置については、車体下部を利用して設置することが考えられる。一方この構成の場合、給電コイルの近傍に磁性体であり導電体であるレールが存在し、給電コイルの磁束と鎖交し、損失となることが懸念される。そこで、電磁界解析を用いて、コイル構成を変化させた場合の給電電力と損失について検討を行った³⁾。

コイルの構成については、一般的な矩形コイルと提案する 8 の字コイルについて検討した(図3)。

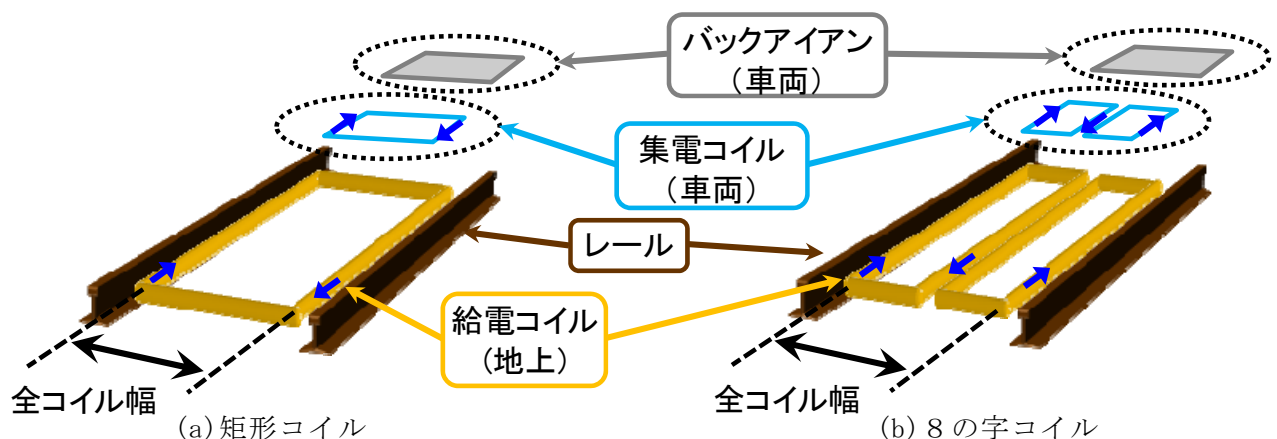


図 3 検討したコイル構成

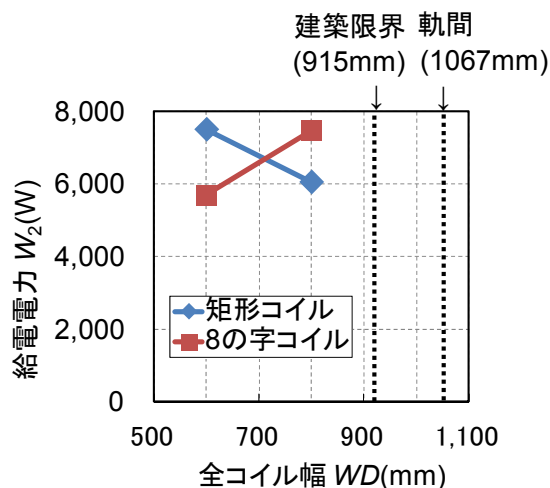


図4 全コイル幅と給電電力

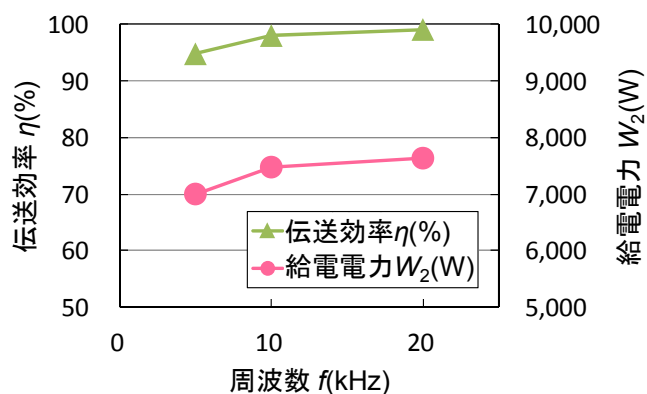


図5 周波数と伝送効率，給電電力

また，全コイル幅について，600mmと800mmの2種類とした。全コイル幅と給電電力について解析した結果を図4に，周波数を変化させた場合の伝送効率と給電電力について解析した結果を図5に示す。

一般に変圧器方式では，給電コイルと集電コイルの対向する面積を増加することで給電電力の増大を図るが，矩形コイルの場合，全コイル幅を拡大しているにも関わらず，給電電力が減少している。矩形コイルの場合，レールに鎖交する磁束が多く，コイル幅の拡大によってレールに近接する影響が大きくなるためである。また，周波数に関して，10kHzを基準とすると，5kHzでは比較的大きな伝送効率と給電電力の低下がみられるが，20kHzでは，それほど大きな変化がみられない。そこで，日本国内における電波法の規制も考慮し，10kHzを採用することとした。

3.4 給電試験装置

これまでの検討結果を元に，車両に搭載可能な給電試験装置を製作中である。この装置を用いて鉄道総研構内試験線でLi-ion蓄電池を有する車両への給電試験を予定している。

4. まとめ

安全性が高く保守が容易で，多頻度の容易な給電を可能とする非接触給電について，損失低減を図る構成を磁界解析により検討し，給電試験装置を製作中である。これらの検討・試験結果から，鉄道車両に適用する非接触給電装置構成についてまとめていく。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 柏木隆行・長谷川均・加藤佳仁・坂本泰明・浮田啓悟：「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」，鉄道総研報告， Vol. 27， No. 7， pp. 29-34 (2013)
- 3) 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)