

# MOTOR

# エレクトロニクス

NO.  
6

磁界共振結合方式でリアルタイム最大効率制御に挑戦

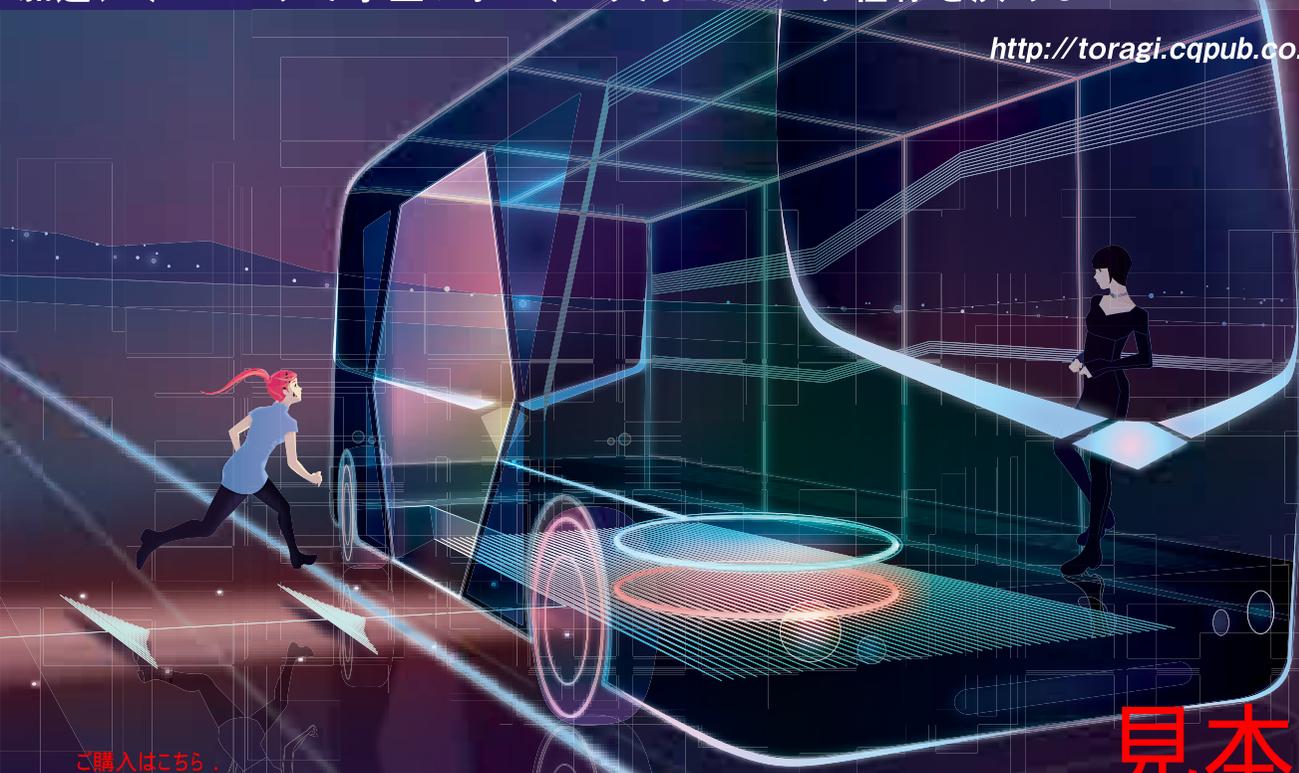
## 実験・EV走行中ワイヤレス給電

急変する中国・欧州・日本のEVワイヤレス充電事情

“ドローン”はヘリコプターよりも安定飛行ができない!?

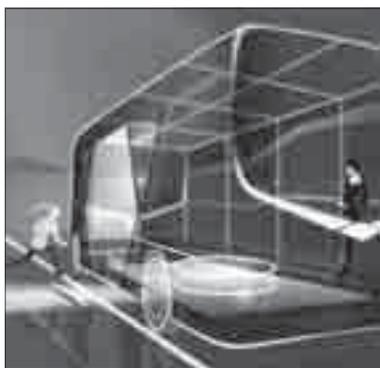
加速シミュレータで学生フォーミュラ用EVモータ仕様を決める

<http://toragi.cqpub.co.jp>



ご購入はこちら  
<http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MTR/MTRZ201701.htm>

見本  
CQ出版社



～ MITの磁界共鳴方式の発表から10年の進化は...～

## 中国・欧州・日本の EVワイヤレス充電事情

横井 行雄

EVの最大の欠点は、航続距離が短いということである。もちろん、搭載する電池の電気容量を増やせば、航続距離を延ばすことが可能だが、その分の電池重量がかさむので、エネルギー効率は極めて悪くなる。また、電池は高価なので、車両コストもアップする。そんななかで、MITが2007年に発表した「磁界共鳴方式ワイヤレス給電技術」の発表は、EVでもワイヤレス給電が可能な時代が来ると予感させる衝撃的なものであった。これが、実現できればEVに搭載する電池容量を減らしても、航続距離を延ばせるからである。その発表から10年経ったが、世界のEV充電技術、ワイヤレス給電技術はどういう状況なのだろうか。欧州・中国を視察した筆者は、EVの市場投入では先行していた日本であるが、EVワイヤレス給電技術の実用化については、欧州・中国に遅れをとっているのではないかと危惧しているという。（編集部）

### 1. クルマのワイヤレス給電は 実用化目前!?

MITが発明した磁気共鳴方式の衝撃

電気自動車(EV)へのワイヤレス充電の技術開発は、2007年に米国MIT(マサチューセッツ工科大学)

による新たな“磁界共鳴方式”の発表がきっかけとなって、急激に活気を得た、といえるでしょう。

実は、それ以前からワイヤレス給電の実用研究が行われていました。それは、鎖交磁界を利用した“電磁誘導方式”の研究が中心でしたが、その場合は数cm程度の距離でしか給電できませんでした。しかし、MITの電磁共鳴方式では、2mの間隙で40%、1mでは90%の効率で給電できるという発表でした。方法は極めてシンプルで、驚愕の効果だったので、当時のワイヤレス給電研究者の多くは、この発表に衝撃を受けたのです(イラスト1)。

同時に、ワイヤレス給電研究が世間から広く注目され、モバイル機器などさまざまな分野で、その応用開発・研究が試みられることにもなりました。研究開発者も一気に増えたように思います。

もちろんクルマの世界でも、EV普及に向けて、ワイヤレス給電実用化の期待が一気に高まりました。

ワイヤレス給電の実用化は低電力から

衝撃のMITの発表からほぼ10年が経ち、現在のワイヤレス給電の状況は、着実に進化しています。実用化に向けての標準化作業も進められています。

15W以下の電力を対象にした電磁誘導方式の国際規格Qi(発音は「チー」)は、スマホ用の非接触充電装

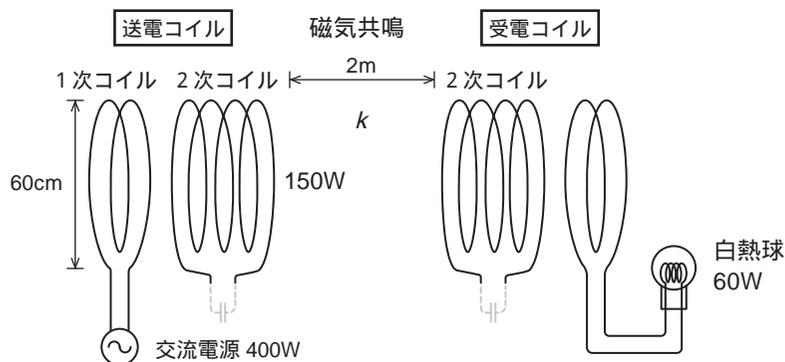
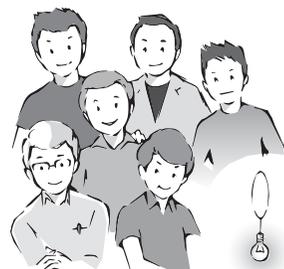


イラスト1 MITの発表概要

MITメンバ



見本



写真1 1947年に開発・販売されたEV「たま電気自動車」の復元車(2016年の自動車技術会の展示)

置として普及しつつあります。一部のクルマにも搭載されているので、利用されている方も多くおられると思います。

もちろん、クルマの動力系でも、EV普及に向けてワイヤレス給電実用化研究が進んでいます。技術的には、電磁誘導方式と電磁共鳴方式の選択ではなく、両方式が融合されながら、標準化、制度化が進んできています。

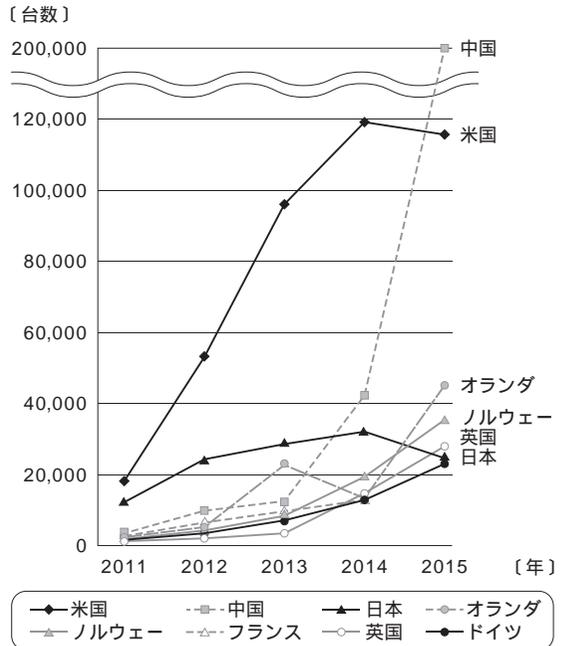
クルマのワイヤレス給電の技術進化は...

世界でいち早くEVの販売が本格化した日本ですから、EV用ワイヤレス給電技術でも世界に先駆けて実用化が進む、と言いたいところですが、実は微妙なところですよ。

中国では、環境問題から新エネ車への政策的な誘導が行われ、EVの加速度的な普及が進みつつあります。また欧州では、独フォルクスワーゲン(VW)の「ディーゼル排ガス事件」の影響からか、欧州自動車メーカ各社のエンジン車からEVへの転換計画が、次々に発表されています。その前から、接触式での大電力の充電も商用化されはじめています。そのような最新の動向を乗用車型EV、バス・トラックを含んだ公共交通について、中国、欧州、日本の動向を紹介します。

## 2. EVの歴史 ～航続距離を延ばす戦い～

EVはガソリン車よりも古く19世紀末の欧州に登場電気自動車(EV)の歴史を少しだけ振り返りましょう。若い方には意外に思われるかもしれませんが、EVが市販されたのはガソリン車の登場よりも若干早く、19世紀の末でした。時速100kmの壁を最初に突破した自動車はEVでした。1900年のパリ万博にはポ



出典: オランダ・ノルウェー・フランス・イギリス・ドイツ: European Alternative Fuels Observatory( EAFO )  
中国・アメリカ: マークラインズ, 日本: 日本自動車工業会( JAMA )

図1 各国のEV・PHEVの販売台数の推移[ 経済産業省, EV・PHEVロードマップ検討委員会の報告書<sup>(5)</sup>から ]

ルシェ設計のEVが展示されました。

戦後の日本のタクシーもEVがあった

日本でも、戦後の深刻な石油不足の中、多くの電気自動車が作られました。その中で1947年の「たま電気自動車(後の日産自動車)は主にタクシーとして使われ、鉛蓄電池を用いて、最高速度35km/h、航続距離96kmの性能を発揮しました。写真1は、2010年に日産リーフの発表の時に、日産自動車のエンジニアの方々がフルリストアされ走行も可能となった「たま自動車」です。

その後、電池の性能とか充電の環境が整わず、ガソリン自動車が多くなり全盛になりました。ガソリン車ほどの航続距離をEVでは実現できなかったのです。

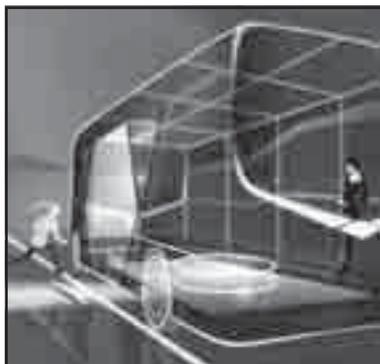
排ガス規制が

一方で20世紀も終わりごろになりガソリン自動車の排気ガスが重大な大気汚染を引き起こし、米国のカリフォルニアなどで環境規制が厳しくなり、排ガスを撒き散らさないEVのブームが起きました。

ただ、電池コストが高い、電池の寿命が短いなどの課題があって、なかなか普及しませんでした。そこで登場したのが、エンジン車とEVとの折衷となるハイブリッド車(HEV)でした。HEVは、EVが搭載する電池よりかなり少ない電池容量の搭載ですむので、信号の多い街中運転中心の日本では、ガソリン車より

見本

# 第1章



～ “停止中ワイヤレス給電” 技術との違いとその必要性～

## EVの自動走行時代の次に必要な “走行中ワイヤレス給電” 技術とは

畑 勝裕

EVの充電は、自宅でもできるのだが、意外に面倒である。ガソリン車に比べて航続距離が短いので、ガソリン給油よりも給電頻度が増える上、充電時間はガソリンの給油時間よりもかかるからだ。安全対策も給油と同様に必要となる。“ワイヤレス給電”が普及すると、その欠点が緩和されるだろう。しかし、航続距離問題・充電時間問題は変わらない。そこで、「走行中にワイヤレス給電ができる」となると航続距離の課題は、大きく改善されるだろう。ただし、“走行中ワイヤレス給電”を実現するには、従来のワイヤレス給電技術とは、異なる発想と技術が必要になるという。

(編集部)

験を通してお話ししていきます。特に、走行中ワイヤレス給電では停車中のワイヤレス給電と異なり、「瞬時の電力伝送」を実現しなければなりません。本稿ではそのための制御技術について紹介しますが、このほかにも数多くの課題を乗り越えなければ、この技術は実用化できないでしょう。

「走行中ワイヤレス給電技術」は別の新技術が必要。実は「走行中ワイヤレス給電」は、これまでの停車中のワイヤレス給電技術の延長線上ではなく、まったく異なる新しい技術として、基礎研究から実証実験に至るまで、1つずつ成果を積み重ねていかなければなりません。本稿では、まさにその開発の過程を紹介したいと思います。

まずこの章では、走行中ワイヤレス給電の必要性について述べていくことにします。

### 0. なぜ今「走行中ワイヤレス給電技術」か

“ワイヤレス給電”のニーズは高まっている

いまやスマホの多くの機種にワイヤレス充電ができるようになってきました。EV(電気自動車)の世界でも、ワイヤレス給電技術は大きな注目を集め、その実用化に向けて注力されてきました。そして今まさに実用化・商用化の兆しが見えてきています。充電プラグを使わないワイヤレス給電はユーザの手間を大きく減らし、安全性の問題も解決するでしょう。

本稿では、さらに先の技術として、走行中のEVに給電する“走行中ワイヤレス給電”について、基礎実

### 1. EVに適した充電方法とは

#### 1.1 なぜガソリン車と同じ？

EVの充電はガソリン給油よりも長時間！

ガソリン車なら、燃料のガソリンがなくなれば、近くのガソリンスタンドに行き、給油口にノズルを入れて給油するのが当たり前です。

同様に現在のEVでは、“充電ステーション”に行くと、充電プラグを差し込み、長い時間をかけて充電し

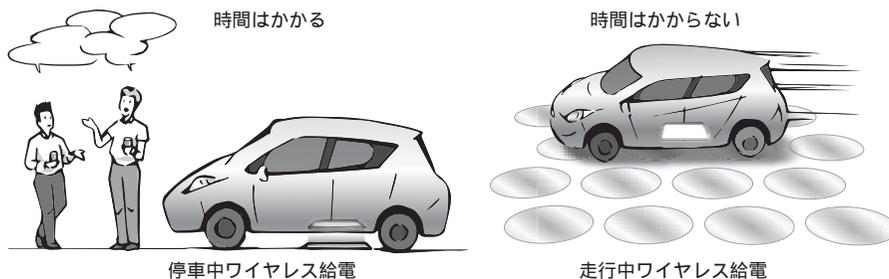


イラスト1-1 停車中ワイヤレス給電と走行中ワイヤレス給電

見本

EV時代のエネルギー補給の方法は変わらないの...?

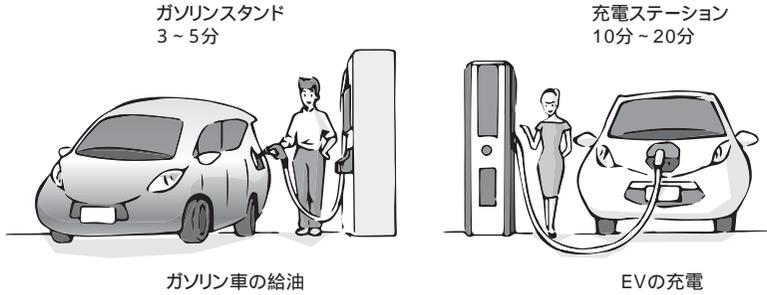


イラスト1-2 ガソリンの給油とEVの充電は同じに見える

ています。自宅や会社などで充電できることは一つのメリットといえるかもしれませんが、外出先での長い充電時間はたとえ急速充電であってもなかなか許容されないのでしょう。

そもそも充電ステーションで給電というのが...

果たして、ガソリン給油と同じように、ノズル/コネクタを使ってEVに給電する(充電する)方法はEVにとって最適といえるのでしょうか。ガソリンであれば短時間に大きなエネルギーを蓄えることは可能ですが、電気では蓄電するためのバッテリーの性能などに依存してしまいます。

電気とガソリンではエネルギーの形態が大きく異なるのですから、EVがガソリン車のまねをするのではなく、EVに適した充電方法を真面目に考えてみるべきではないでしょうか。

## 1.2 エネルギーから見たワイヤレス給電技術

電気エネルギーは他のエネルギー形態に変換が容易なことから、EVは電気エネルギーを使って走ります(正確には「電気エネルギーでモータを回して、機械エネルギーに変換して走る」)。EVであれば、このエネルギーをリチウム・イオン電池や鉛電池などの化学エネルギーとして蓄えていて、走るときに電気

エネルギーに変えているわけです。

つまり、電気エネルギーは既に変幻自在に変換されているのに、充電するときだけは接触式の充電プラグを使って、インフラからEVまで電気エネルギーの形のまま送っています。もちろん、エネルギーを変換しないため大電力で高効率な充電プラグを作ること可能でしょうが、利便性はイマイチでしょう。

エネルギー変換技術が重要

これに対して、ワイヤレス給電は上手にエネルギーを変換することで、EVに「ワイヤレス」で給電できる技術です。

エネルギー変換技術が大きく進歩した今、プラグ式の充電とワイヤレス給電の間には、どの程度の違いがあるのでしょうか。

## 1.3 ワイヤレス給電によって変わる未来のクルマ

ワイヤレスの意義は...簡単! 綺麗! 安全!

さて、EVの充電が「ワイヤレス給電」に代わると、どういうメリットがあるのでしょうか(図1-1)。

まず、充電プラグのとりまわしが不要となり、手を汚さず簡単に充電ができます。また、充電時の水やゴミによる感電事故の心配がありません。

充電に対する面倒さがなくなり、小まめに充電する

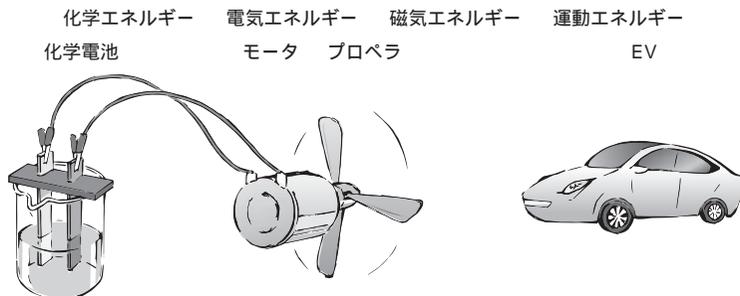


イラスト1-3 電気エネルギーは変幻自在なのに...

見本



～走行中でも高効率・  
大電力長距離伝送を実現するには～

### ワイヤレス給電に “磁界共振結合方式”を選ぶ

畑 勝裕

ワイヤレス電力伝送といっても、その実現方式はいろいろある。どの方式を選択するかは、適用するアプリケーションが要求する仕様や制約によって、適切に判断すべきである。ここでは、まず各ワイヤレス電力伝送方式の長所や短所について述べる。そして、走行中ワイヤレス給電に最も適した方式として“磁界共振結合方式”を選んだ理由を解説する。なお、この方式は“磁界共鳴方式”とも言われている。(編集部)

## 1. ワイヤレス電力伝送の方式

### 1.1 ワイヤレスで電力を送るためには

ワイヤレスでエネルギーを伝送する媒体は何か？

ワイヤレス電力伝送とは、電線(Electrical Wire)を使うことなく、電気エネルギー(電力)を空間中を通して伝送することです。そのためには、電線(ケーブル)の代わりに、エネルギーが通る媒体を何にするかということになります。

考えられる媒体は、例えば次のようなものです。

- (1)コイル間の磁界
- (2)空間中に放射される電磁波

- (3)コンデンサの電極間の変位電流
  - (4)空間中に放射される超音波
- 上記以外にも、多くの方式が検討されてきました。実用化されている/されつつある方式  
それらのうち、現在のところ実用に耐えうる特性を示すワイヤレス電力伝送としては、図2-1に示す

- (1)電磁誘導方式
  - (2)磁界共振結合方式
  - (3)マイクロ波方式
- の3つの方式があります。このほかにも、  
(4)電界で結合する電界結合方式  
なども、最近研究・開発が進んでいます。ただし、ここでは上記3方式を説明します。

#### (1)電磁誘導方式

送電コイルが磁界生成し受電コイルで起電力発生  
ワイヤレス電力伝送は、

- ・非放射型：場のエネルギー(電界/磁界)を利用
- ・放射型：空間中の放射エネルギー(電磁波)を利用

に大別できます。そのうち、非放射型として最も理解しやすいのが、この“電磁誘導方式”です。

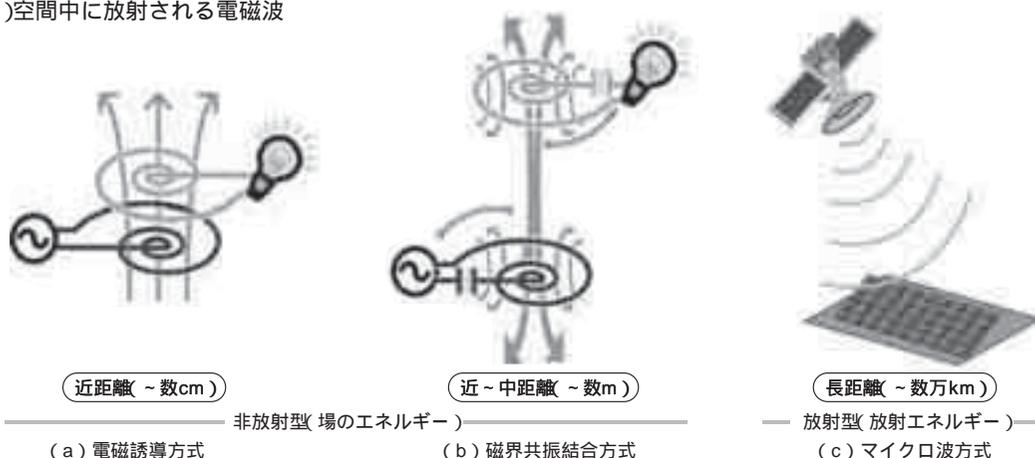


図2-1 ワイヤレス電力伝送の方式

Qi規格によって家電機器で実用化

この方式では、送電コイルが発生させた磁界によって受電コイルに誘導起電力を生じさせ、電力を送ります。電磁誘導方式は、既に“Qi(チーと発音)”などの国際標準規格が定められていて、電気機器用のワイヤレス給電装置として製品化もされています。

数十cm以上の距離では送電が難しい

しかし、この方式では、長距離伝送では効率が急激に低下してしまい、EVの走行中ワイヤレス給電での採用は、実際には難しいと考えられます。

給電可能な距離は、コイルの形状・大きさで大きく変わります。ちなみにQi規格(Version1.2)では、コイル間の距離は45mmと定められています。ただし、この規格ではコイルの大きさも最大で70mmと抑えられているので、この方式の距離の限界を示すものではありませんが、現状では限界があるといえます。

## (2)磁界共振結合方式

送電器と受電器のLC共振を利用

磁界共振結合方式も、電磁誘導方式と同様に磁界を使って電力伝送をしますが、「送電器の共振と受電器側の共振が共鳴する現象を利用」していることが大きな特徴です。

具体的には、送・受電コイルと共振コンデンサのLC共振によって、高効率で大きなギャップ、位置ずれに強いといった特性を持っています(写真2-1)。

電磁誘導方式でも力率改善のためにコンデンサを利用している例もありますが、磁界共振結合方式は電磁誘導方式の中でも、ある特定の条件(共振条件)を満たすことで優れた特性を実現しています<sup>(1)</sup>。

2007年にMITで提案された方式

この方式は、2007年にMIT(マサチューセッツ工科大学)によって提案されました<sup>(2)</sup>。これ以降、ワイヤレス電力伝送に関する研究は、一気に注目を集めるとともに、多くの特許出願がされるなど、産業界に大きなインパクトを与えました<sup>(3)</sup>。もちろん、EVでのワ



写真2-1 磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送

イヤレス給電分野でも大きな影響を与え、この方式を採用した研究・開発が増えています。

kHz帯からGHz帯まで対応可能

もともとはISMバンドである13.56MHzで使われることが多かったのですが、kHz帯やGHz帯でも実装できることが明らかになっています。EVのワイヤレス給電では85kHz帯を利用する方向で進んでいます。この周波数帯であれば、パワエレによる高効率な電力変換技術の恩恵も受けられるでしょう。

## (3)マイクロ波方式

電磁波を用いた電力伝送方式

マイクロ波方式は、文字どおり極超短波帯の電磁波を用いた電力伝送で、放射エネルギーを利用しています。そのため、非放射型の電磁誘導方式や磁界共振結合方式と比較すると、長距離の電力伝送に適しています。

長い距離の電力伝送には有効な方式だが...

主に2.45GHzや5.8GHzなどのISMバンドが使われることが多く、離島間での電力伝送や宇宙太陽光発電における地球への送電など、現在も盛んに研究されている方式です<sup>(4)</sup>。

しかし、EVのワイヤレス給電では、伝送距離が数十cm程度なので、この場合における伝送効率は磁界共振結合方式に優位性があります。

### 1.2 磁界共振結合方式の選択

決定打とはいえないが磁界共振結合方式で

以上のことから、本稿ではEVのワイヤレス給電に適した特性を持っている“磁界共振結合方式”に着目してお話ししていきます。

しかし、この他にもさまざまな方式を用いた独創的なシステムや実用性を備えたシステムなどが考えられるため、現段階ではどの方式が良い、悪いということ議論するのではなく、多様なシステムについて検討を重ねることで走行中ワイヤレス給電技術を進歩させていかなければならないでしょう。

そのため、本稿で紹介する手法が唯一の解ではなく、さまざまな技術を積み重ねて、より実用に適したシステムを作り上げていかなければなりません。

## 2. 磁界共振結合方式の特徴

### 2.1 直列共振と並列共振

LC共振回路を採用する

磁界共振結合方式では、送電器および受電器で共振現象を利用すると述べましたが、この共振をとる方法によっても特性が大きく異なります。共振回路には、いろいろな方式がありますが、ここでは最も基本的



～理論に基づく制御系設計～

## 走行中給電のリアルタイム最大効率制御

畑 勝裕

“磁界共振結合方式”のワイヤレス給電と決めたので、次にその実現法を考える。送電装置のコイルは道路上(あるいは側方)に固定される。走行中給電では、送電コイル上に進入したEVは、実はあっという間に通過してしまう。つまり、ワイヤレス給電装置では、極めて高速に応答ができる制御を実装しなければならない。この章では、リアルタイム性を重視した結合状態の推定手法ならびに最適負荷を実現する高応答な制御系設計について説明する。制御系の設計には、モデル・ベース設計手法を用いている。(編集部)

### 1. 本研究の狙い

#### 筆者らの研究の目的

本来の筆者らの研究課題は、回路理論や制御理論などに基づいたワイヤレス給電の制御系設計とその応用です。そこで本稿での目的は、走行中ワイヤレス給電の振る舞いや高応答な制御による有効性を検証することです。

ここで提案した制御手法を実際のEVや送電設備などにそのまま導入できるかは、さらなる検証が必要です。しかし、アスファルトなどの道路に用いられる構造部材やEVのシャーシなどが与える影響を見積もるためにも、理論に基づく検討と理想環境下における実証実験はとても重要な基礎研究といえます。

#### 今回紹介する実験の目的

当然ながら、理論上では可能であっても実際の応用に至るまでには多くのステップを要します。第5章において、さまざまな課題や基礎研究ならびに応用研究の重要性について述べますが、私たちも次のステップとして、実際の道路環境におけるEVの走行試験に向けて実験環境を構築する準備をしています。本稿では理想条件下での実験となりますが、今後のさらなる報告に期待しててください。

### 2. 電力変換器を用いた制御

#### 2.1 なぜ電力変換器？

負荷は走行中に変動するが、最適負荷にするには...これまで述べたように、ワイヤレス給電システムにおいて伝送効率を最大化するためには、第2章の式(2-6)に示した“最適負荷 $R_{L\max}$ ”を実現しなければなりません。しかし、EVの走行中ワイヤレス給電では、実際の負荷が大きく変動します。

そこで、負荷のインピーダンスが最適に見えるように制御(見掛け上のインピーダンス変換)をしなければなりません。

最適負荷にするためインピーダンス変換するには...

このとき、インピーダンス変換を実現するためにはさまざまな手法が考えられます。

(1)可変抵抗やバリコン(可変コンデンサ)を用いる

直接的に素子値を変える手法も可能です。しかし、モータなどのアクチュエータを使って、正確につまみを回したとしても、機械的な回転運動や余計な制御系などを途中に挟んでしまうため、高精度かつ高応答な制御を行うことは難しいでしょう。

(2)電力変換器を用いる

電力変換器(コンバータ)<sup>注1</sup>を利用すると、機械的な運動をまったく使わずにインピーダンスの制御ができます。負荷のインピーダンスは電気的な特性なので、機械系の時定数に制限されることなく、電気系の時定数のみで設計できる電力変換器の方が高速かつ高精度な制御が可能でしょう。

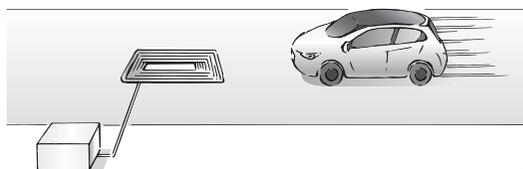


イラスト3-1 走行中ワイヤレス給電の実験

# 見本

それぞれに電力（電圧・電流・AC/DC）値がある

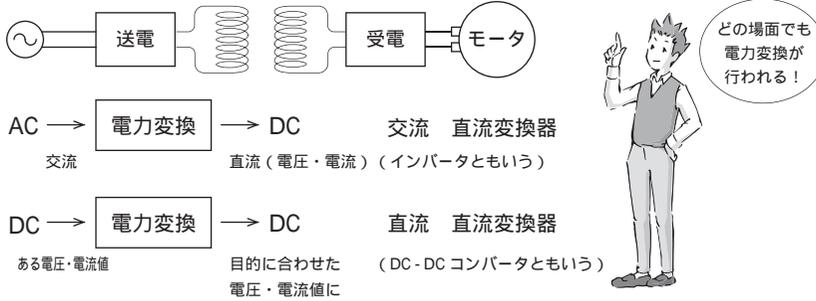


イラスト3-2 肝は電力変換器

次節からはシステム構成やアプリケーションに応じて、変換器の種類を選択していきます。

## 2.2 変換器の種類とインピーダンス変換

インピーダンス変換にDC-DCコンバータを使う

ここでは電力変換器の中でも、直流-直流変換を行う“DC-DCコンバータ”を利用します。また、入力電圧と出力電圧の関係から、昇圧コンバータ、降圧コンバータ、昇降圧コンバータに分けられるため、各コンバータの動作からインピーダンスの変換手法と変換可能な動作範囲について説明していきます。

原理の説明に数式を若干用います。

電力変換器といっても入力と出力の電力は同じまず、変換器における入力電力と出力電力の関係に着目します。変換器の損失を無視すれば、エネルギー保存則から

$$V_{in} I_{in} = V_{out} I_{out} \dots\dots\dots(3-1)$$

が成り立つため、昇圧した場合 ( $V_{in} \leq V_{out}$ ) には出力電流は入力電流に対して小さくなります ( $I_{in} \geq I_{out}$ )。

このとき、変換器の出力として接続される負荷の抵抗  $R_L$  は

$$R_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{V_{out}}{I_{out}} \dots\dots\dots(3-2)$$

変換器の入力から見たインピーダンス  $Z_{in}$  は

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \dots\dots\dots(3-3)$$

と記述できます。昇圧コンバータの動作から

$$\frac{V_{in}}{I_{in}} \leq \frac{V_{out}}{I_{out}} \dots\dots\dots(3-4)$$

が成り立つため、見掛け上のインピーダンス  $Z_{in}$  は

$$Z_{in} \leq R_L \dots\dots\dots(3-5)$$

となります。つまり、ワイヤレス電力伝送における負荷インピーダンスを実際の負荷抵抗値よりも小さく見せることができます。

DC-DCコンバータは昇圧型か降圧型か

ワイヤレス電力伝送の受電側に電力変換器を利用したシステム構成を図3-1に示します。DC-DCコンバータとして昇圧コンバータを選択すれば、負荷インピー

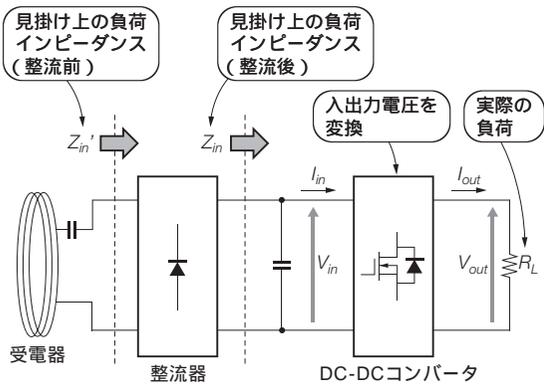


図3-1 電力変換器によるインピーダンス変換

	昇圧コンバータ	降圧コンバータ	昇降圧コンバータ
入出力電圧比 ( $V_{out}/V_{in}$ )	1より大きい	1より小さい	1をまたいでどちらも可
インピーダンス変換領域 (理論上、実際には限界あり)	$0 \leq Z_{in} \leq R_L$	$R_L \leq Z_{in} \leq$	$0 \leq Z_{in} \leq$

表3-1 磁界共振結合における各方式の比較

注1: ここでいう“電力変換器(パワー・コンバータ)”とは、電圧・電流を変換する装置(素子)を示している。DC-DCコンバータ、AC-DCコンバータ、DC-ACコンバータ、AC-ACコンバータなどがある。電力変換器といっても、入力側の電力値と出力側の電力値が変わるわけではない。入力と出力の電力の形態(電圧、電流、直流、交流/周波数)を変換する。なお、DC-ACコンバータのみ“インバータ(Inverter)”という。コンバータの中でAC-DCコンバータは、「整流器」であり、よく使われるコンバータであった。一方、DC-ACコンバータは、整流の「逆(invert)変換」をすることから“逆変換器”といわれることもある。

見本



～送電側のインピーダンス変化で車両接近を検知して送電制御～

## センサレス ON/OFF 送電制御システム

畑 勝裕

ここではEV側の制御から離れて、地上設備となる送電側の制御について述べる。送電側では、送電設備の簡単化のために高度な制御は行わない方針である。しかし、EVがいない区間で不要な電力を放出し続けるのは非効率的だし、膨大な待機電力が必要となるシステムは社会に受け入れられないであろう。最低限でも地上設備における車両の検知と送電のON/OFF制御は必須の技術といえる。

(編集部)

制御法をベースとして、

- ・経年劣化によるパラメータ変動
- ・飛来物(異物)の検知など

に対応するために、さらなるアップデートを重ねて、より実用的なシステムへと一歩ずつ確実に発展させていくことが、走行中ワイヤレス給電の実現に近づけるのではないのでしょうか。

### 2. 送電側のインピーダンス変化で車両検知

#### 1. 本章の研究の狙い

筆者らの研究の目的

ここでは、第3章と同様に、鉄損の影響が少ない理想的な環境において、磁界共振結合方式の回路的な特性に基づいて「センサレス送電ON/OFF制御」を実現します。

「またしても理論検証に基づく基礎研究か」と思われるかもしれませんが、走行中ワイヤレス給電を実現するためには、走行に伴うシステムの動的な振る舞いを扱わなければなりません。実際の運用に耐えうる設計指針を示すためにも、理論による検証は不可欠といえるでしょう。

本研究で示した車両検知手法および送電ON/OFF

#### 2.1 なぜ車両検知が必要なのか？

EVの有無に関係なく送電し続けたら...

まず初めに、車両検知をまったく行わず、EVの有無によらずに送電し続けた場合を考えてみます。送電側も受電側も含めたワイヤレス電力伝送システム全体の等価回路は、前の章でたびたび示してきました(例えば図2-4, 後出の図4-2)。相互インダクタンス $L_m$ を挟んで、送電側と受電側とが接しています。

図4-1ではEVが送電器の上から走り去ってしまい、送電器と受電器の結合がほとんどない状況を示しています。つまり、図2-4の左側の送電器だけになっています(インバータのブリッジ回路を記入)。このとき、相互インダクタンス $L_m$ は0となるため、送電側インバー

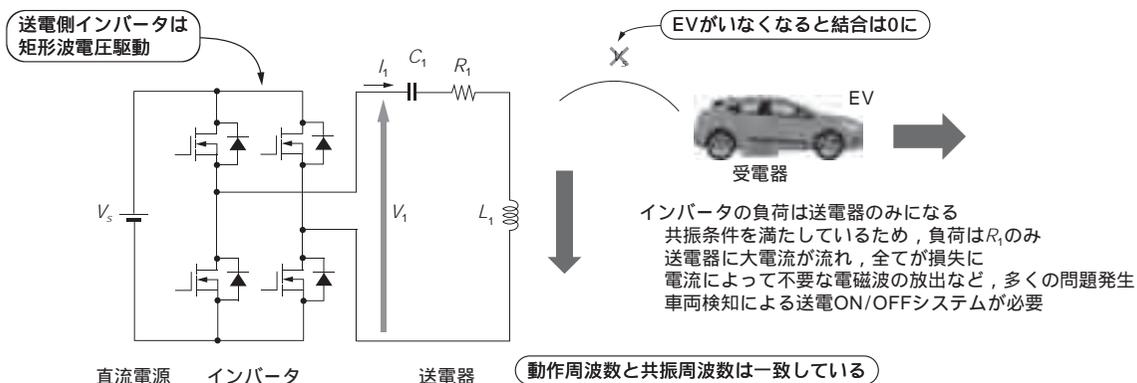


図4-1 送電器上にEVがいなくなった場合の問題点

見本

タに接続された負荷は送電器のみとなっています。

送電側のあるいは送電インバータの負荷は

内部抵抗だけなので...

さらに送電側の回路を考えます。磁界共振結合のワイヤレス電力伝送を利用するため、「送電器の共振周波数」と「インバータの動作周波数」が一致しているので、インバータから見たインピーダンスは、送電器の内部抵抗  $R_1$  のみで決まってしまう。つまり、送電器には大電流が常に流れてしまうでしょう。

このとき、送電器の内部抵抗によって大きな銅損が発生するだけでなく、この大きな電流によって生じた磁界が不要な電磁ノイズを放射する原因となってしまうかもしれません。

車両の検知をしてEVがない時はOFFにする

そのような無駄を生じさせないためには、送電側で車両検知および送電ON/OFF制御を実現すべきでしょう。そうでないと、走行中ワイヤレス給電をインフラに導入することは難しいでしょう。

センサを増やすことなくEV車両検知をする

筆者らの研究室では、車両検知のために新たなセンサを増やすのではなく、インバータから見たインピーダンスの変化に着目することで、センサレス送電ON/OFF制御を実現しました。

まずは、これについて紹介します。

## 2.2 送・受電結合の変化によるインピーダンス特性

送電側インピーダンスは受電側との結合状態で変化  
送電器と受電器の結合状態によって、送電側インバータから見たインピーダンスは大きく変化します。図4-2に示す磁界共振結合のT型等価回路に基づいて、結合を含めた負荷側の合成インピーダンス  $Z_2$  は、

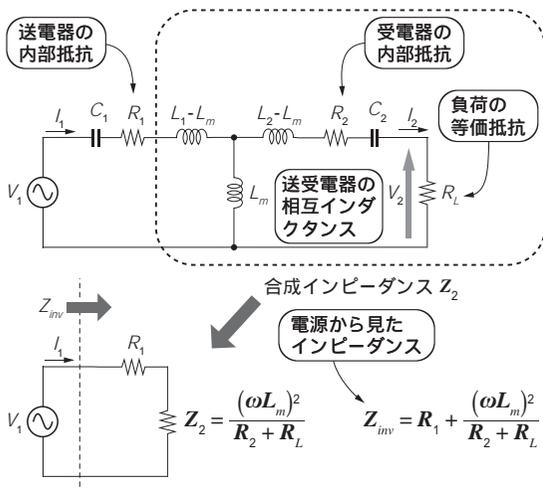


図4-2 送電側インバータから見たインピーダンス

$$Z_2 = \frac{(\omega L_m)^2}{R_2 + R_L} \dots\dots\dots(4-1)$$

で表せます(共振条件を満たし、鉄損は無視できる条件において)。ここで、インバータから見たインピーダンス  $Z_{inv}$  は、

$$Z_{inv} = R_1 + Z_2 = R_1 + \frac{(\omega L_m)^2}{R_2 + R_L} \dots\dots\dots(4-2)$$

で与えられます。

相互インダクタンス  $L_m$  の変化に対する  $Z_{inv}$  を図4-3に示します。前で述べたように、結合がほとんどない条件では  $Z_{inv}$  はほぼ  $R_1$  となります。一方で、ある程度の結合がある場合には負荷のインピーダンスも加わり、受電側の回路に電力が伝送されます。

EVがないとインピーダンス小で大電力が放出!

ここで、EVの有無によるインピーダンスの違いについて着目します。図4-4を見てください。EVが送電器上に存在し、送・受電器が十分に結合しているとき、インバータから見たインピーダンスはEVの負荷も含まれるため、EVがない場合と比較して小さくなります。

一方で、EVがない場合は送電器の内部抵抗  $R_1$  のみとなるため、そのインピーダンスは極めて小さいので、そのままでは大電流が流れてしまいます。

送電器側のインピーダンスからEVの存在が分かるしたがって、電気的特性であるインバータから見たインピーダンスさえ利用できれば、付加的な磁気センサや光センサなどは不要であり、カメラを使った画像処理などの高度な検知技術も使わずに車両検知を実現できるはずです。

筆者らは、このインピーダンス特性を利用して、車両検知に応用しました。

## 2.3 サーチ・パルスによる車両検知(1)

送電器にサーチ・パルスを印加してEV存在を検出  
このインピーダンスの違いを利用するためには、EVがない場合にもインバータから電力を供給しな

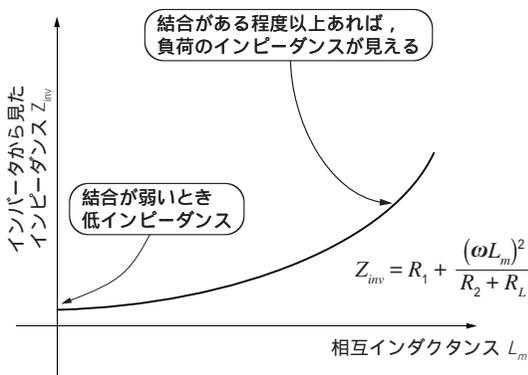


図4-3 結合の変化に伴うインピーダンス特性

見本



～安全対策と法制度，  
そして高性能コンポーネントの開発～

## 実用化に向けた課題

畑 勝裕

EVの走行中ワイヤレス給電を実現するために瞬時の電力伝送を可能にする制御技術について紹介した。しかし、実用化に至るまでにはさまざまな課題をクリアしていかなければならない。ここでは、現在は実用化に向けてどの程度の技術レベルにあるのか、分かっている課題について考える。最後に、模型車両を使った走行中ワイヤレス給電の実験の様子を示す。

関わるさまざまなシステムの一部を抜粋したものです。実際に電力伝送を行う送電側の地上設備とエネルギーを受け取るEVシステムだけでなく、他のシステムとの相乗効果や悪い影響への対策・防護指針など、多岐にわたってシステムの設計・運用を考えなければいけません。

求められるコンポーネントの高性能化

地上設備であれば、どの程度の電力容量の設備とし、どの程度の数量で設置するのか、といったシステム的な設計から、送電器の高効率化を図るためにコイルに用いる線材の最適化、磁気結合を強めるフェライトの利用など、採用するコンポーネントの高性能化も重要な研究といえます。

このほか、EVシステムであれば電源系や駆動系などの設計が必要ですが、さらに下の階層まで見れば、利用する蓄電デバイスや電力変換器の構成、ワイヤレス給電用の受電回路など、階層ごとにさまざまな課題があることが分かります。

ここでは、コンポーネントの高性能化から実用に適したシステムの構築、他のシステムとの共存に至るま

### 1. 課題の抽出と分類

実用化へ向けて残っているさまざまな課題

まず、想定される「走行中ワイヤレス給電システム」の課題をシステムの階層に分けて分類してみます。ここで挙げる課題は、現在把握できているモノの一部でしかなく、紙幅の都合で全てを示すことはできませんが、要求される仕様を満たすようなシステムを設計し、長期にわたって運用していくために重要な課題といえるでしょう。

図5-1に示すのは、EVの走行中ワイヤレス給電に

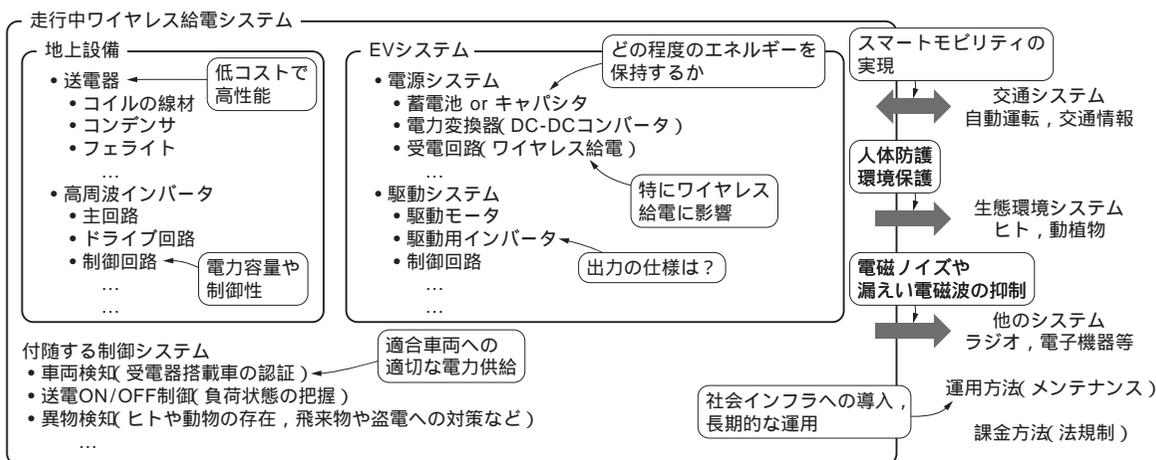


図5-1 走行中ワイヤレス給電に関わるシステムの一部

見本

で、想定すべき課題について幾つかピックアップしてみます。これによって研究開発の方向性としてどの階層で、どんな技術が必要とされているのか、そしてどのようなアプローチによって走行中ワイヤレス給電システムが実用化に向かうのか、考えてみましょう。

## 2. コンポーネントの高性能化

まず、さまざまなシステムに利用するコンポーネントを最適化することで、走行中ワイヤレス給電システムの高効率化や高性能化を図れるでしょう。このほかに、メンテナンス性の向上や低コスト化、強度や耐電圧などの特性値の改善などを図るために、利用する物質そのものやそれらの組み合わせ、製法の工夫などの基礎研究も重要といえます。

### 2.1 送・受電コイルの線材を選定する

コイル線材のQ値がとて重要

まず、磁界共振結合方式を用いたワイヤレス電力伝送では、送・受電コイルの結合だけでなく、それらコイルのQ値がとて重要であることを第2章 2.2節で述べました。

小型化と内部抵抗

走行中ワイヤレス給電では、送電器は道路の内部(中央分離帯なども考えられるが)に設置できなければならないため、形状に制約が課されることが多いでしょう。

この制約下では、インダクタンスの大きさはある程度決まってしまうとすると、交流抵抗であるコイルの内部抵抗値を下げなければ高効率化は望めません。

表皮効果対策と近接効果対策

表皮効果が少ないリッツ線の利用はこれまで有効とされてきましたが、近接効果による影響(コラムE参照)や、コストなども考慮した場合に、最も優れているのは果たしてどの線材なのでしょう。

一意に線材を決められるか...

また、電力容量によって許容電流も異なるため、一意に設計することは難しいですが、導入するシステムに応じて線材を適切に設計あるいは選択していくべきでしょう。

線材やコイル形状に依存した交流等価抵抗の理論化は進められているのですが、うまく一致する方法を探すのはなかなか難しく、理論値と実験値に乖離があるのが現状です。

今後、より正確に交流抵抗を見積もることができれば、送受電器のコイル設計にとても役立つでしょう。

### 2.2 磁性材料(特にフェライト)の利用

電気回路だけでなく磁気回路設計も重要に

先ほど述べたように、コイル形状が制約されている場合、線材だけを利用した空芯コイルでは十分な性能が得られないことが大いにあり得ます。

この場合、コア(鉄芯)を使うこととなります。コア材としてフェライトなどの磁性材料を用いて、適切

## コラムE 高周波電流における表皮効果と近接効果

### 表皮効果とリッツ線

1本の太い導線に高周波の交流電流を流したときに、導線断面に平均的に流れるのではなく、表面部分のみに流れる現象を“表皮効果”といいます。

また、導線の内部では、本来の電流が流れる方向(線方向)とは垂直方向の渦電流が生じやすく、損失が生じます(図E)。

この現象は、周波数が高くなるほど、また導線の断面積が広いほど、より顕著になります(この現象と対策については、『MOTORエレクトロニクス』No.5の特集でも取り上げられています)。

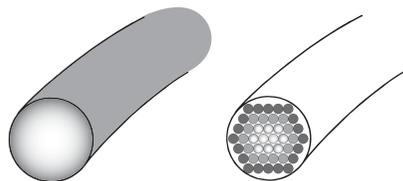
そこで、高周波の導線には、細い線を束ねたリッツ線がよく使われています。

### 近接効果とリッツ線

近接した複数の導線が束状になっているときに高周波の交流電流を流すと、断面的に束全体の外側を

中心に電流が流れるようになります。この場合も、あまり電流が流れない場所で、渦電流が生じて損失も生じます。この現象を“近接効果”といいます。

大電流になるほど、また導体の総面積が広がるほど、この近接効果の影響が出やすく、どこからか表皮効果よりも大きい影響を与えるといわれています。



図E 表皮効果(左)と近接効果(右) - 濃いところほど電流が大きい

見本

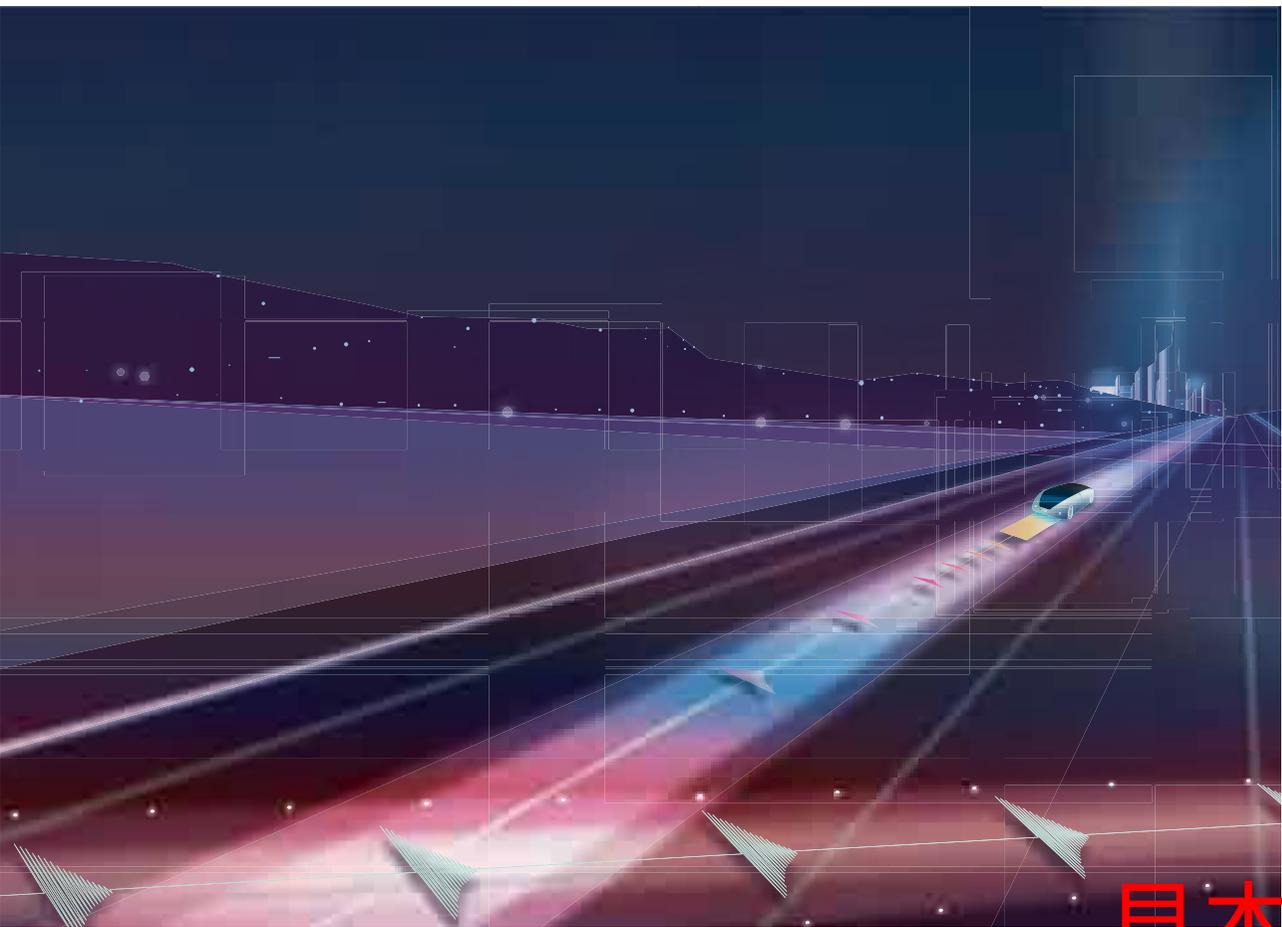
トヨタ技術 増刊

# MOTOR EARTH No.6

CQ出版社

〒112-8619 東京都文京区千石4-29-14 TEL.03-5395-2141(販売)  
TEL.03-5395-2131(広告) / 03-5395-2123(編集) / 03-5395-2115(その他)

定価：本体2,400円＋税



見本

雑誌 06664-01  
Ⓛ 2017.2.15



491006640170  
02400